

CIENCIA • HUMANISMO • SOCIEDAD

De los sistemas complejos a la imaginación heterodoxa

GERMINAL COCHO GIL

Octavio Miramontes ⊙ Eduardo Vizcaya ⊙ Marisol Cocho ⊙ Gustavo
Martínez-Mekler ⊙ Pedro Miramontes ⊙ José Luis Gutiérrez ⊙ Raúl Rechtman ⊙
Octavio Valadez ⊙ Hugo I. Cruz ⊙ Paola Ballesteros ⊙ Evangelina Figueroa ⊙
Leonor Huerta ⊙ Shahen Hacyan ⊙ Maximino Aldana ⊙ Carlos Villarreal ⊙
Enrique Ruelas ⊙ Alberto Lifshitz ⊙ Moisés Villegas ⊙ Flavio Cocho
(Coautores)

EditoraC3
CopIt-arXives
Publishing Open Access
with an Open Mind
2017

Este libro contiene material protegido por leyes de autor

Todos los derechos reservados © 2017

Publicado electrónicamente en México, por CopIt-arXives y EditoraC3.

Diseño de portada por Octavio Miramontes basado en dibujos de V. Losin.

Fotografías de la Introducción, cortesía de Octavio Valadez.

Obra editada por Octavio Miramontes, Eduardo Vizcaya, Danna Oassis, Dulce Guillén y Jaime García.

Ciencia • Humanismo • Sociedad. De los sistemas complejos a la imaginación heterodoxa;
[autores] Germinal Cocho Gil *et al.* — México CDMX: CopIt-arXives y EditoraC3, 2017
Incluye bibliografías e índice
ISBN: 978-1-938128-13-4 ebook

Derechos y permisos

Todo el contenido de este libro es propiedad intelectual de sus autores quienes, sin embargo, otorgan permiso al lector para copiar, distribuir e imprimir sus textos libremente, siempre y cuando se cumpla con lo siguiente: (i) el material no debe ser modificado ni alterado, (ii) la fuente debe ser citada siempre y los derechos intelectuales deben ser atribuidos a sus respectivos autores, (iii) estrictamente prohibido su uso con fines comerciales.

El contenido y puntos de vista planteados en cada capítulo es responsabilidad exclusiva de los autores y no corresponden necesariamente a los de los editores o a los de ninguna institución, incluidas CopIt-arXives o la UNAM.

Producido con software libre incluyendo \LaTeX . Indexado en el catálogo de publicaciones electrónicas de la UNAM y en Google Books.

Todas las figuras e imágenes son cortesía de los autores, a menos que se señale lo contrario explícitamente.

Los editores agradecen el apoyo de DGAPA-UNAM a través de los proyectos PAPIIT IN-105015 y PAPIIME PE-106516.

ISBN: 978-1-938128-13-4 ebook

Este libro ha pasado por revisión de pares

CopIt-arXives

Cd. de México - Cuernavaca - Madrid - Curitiba
Viçosa - Washington DC - London - Oxford

Con el apoyo de la
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
Instituto de Física © Centro de Ciencias de la Complejidad

ÍNDICE

PRÓLOGO	XI
INTRODUCCIÓN	XIII
DINÁMICA DE LA MATERIA COMPLEJA VIVA	1
Introducción	1
Origen y evolución de la materia viva	2
Un universo en expansión	3
La autoorganización	6
El borde del caos: motor de la creatividad	8
Fenómeno social y sociedades artificiales	9
Bibliografía	17
Lecturas recomendadas	18
ALGUNOS ASPECTOS DE LA TERMODINÁMICA DE LA VIDA	19
Bibliografía	24
ERNST MAYR, LA TEORÍA SINTÉTICA DE LA EVOLUCIÓN Y UNA NUEVA VISIÓN DEL AZAR Y LA NECESIDAD	25
La conferencia de Princeton y la teoría sintética de la evolución	26
Evolución y desarrollo, otro conflicto, otro puente	30
Bibliografía	33
SOCIEDADES COMPLEJAS	35
Fenómenos críticos y evolución al borde del caos	35
Kuhn y las revoluciones científicas y sociales	39
Cambio rápido y obsolescencia	40
Comunidades de práctica	43
Puentes, interfases inteligentes y objetos fronterizos	44
Enfermedades complejas y una anécdota	44
Comentarios finales	46

EL MEDIO INTERESTELAR Y EL ORIGEN DE LA VIDA	49
El origen de la vida en la Tierra. Los problemas de la ventana temporal y de la quiralidad	50
El medio interestelar y el origen de la vida	53
Comentarios finales	56
Bibliografía	57
LA CIENCIA Y SUS DEMONIOS	59
<i>La Naturphilosophie</i>	60
Otra oscilación del péndulo	61
El mundo hoy	62
Los demonios de la ciencia	63
Asombro y escepticismo	65
Interrogantes	66
Colofón	69
LA EVOLUCIÓN BIOLÓGICA DESDE LA PERSPECTIVA DE LA COMPLEJIDAD	71
Una nueva Edad Media	71
Diseño inteligente o evolución por selección natural	72
La síntesis	76
Sistemas complejos	78
La ciencia reduccionista	81
El problema del origen de la forma	83
La autoorganización	84
La filotaxia	85
Azar y necesidad o los límites de lo contingente	87
De la fragilidad de lo fortuito	87
Hacia una propuesta racional y materialista	90
Colofón	91
Bibliografía	92
CIENCIA Y HUMANISMO, CAPACIDAD CREADORA Y ENAJENACIÓN	95
I. Del imperialismo de la física	95
II. La matemática del mundo del mañana	97
III. Sobre la crisis del paradigma dominante	99
IV. La reacción	101
V. El mundo hoy: cambio rápido, revolución permanente y obsolescencia	102
VI. ¿Desaliento o esperanza?	103
VII. Las culpas	104
VIII. Complejidad y cambio posible	106
IX. Conclusión	110
Bibliografía	112

EL UNIVERSO EN EXPANSIÓN	113
La curvatura del espacio-tiempo	114
Los primeros instantes	115
Tres problemas de la cosmología moderna	116
Espacio-tiempo y vacío cuántico	117
El Universo inflacionario	120
Perspectivas	121
Bibliografía	122
TEORÍAS DE SISTEMAS: HAKEN, PRIGOGINE, ATLAN Y EL INSTITUTO SANTA FE	123
Bibliografía	127
AL BORDE DEL MILENIO: CAOS, CRISIS, COMPLEJIDAD	129
Complejidad	129
No linealidad	131
Criticalidad	140
Interdisciplinariedad	142
Reflexiones	149
Agradecimientos	150
Bibliografía	150
Lecturas recomendadas	152
LA VIDA... ¿SE ORIGINÓ EN LA TIERRA?	155
Aquí mismo	155
Mensaje en una botella	156
La información necesaria	157
El meollo de la vida	158
Las primeras pistas	159
¿Qué fue primero?	160
¿Y el agua?	161
¿Y el tiempo?	162
¿Casualidad, accidente u origen extraterrestre?	163
No todo está resuelto	164
LA REVOLUCIÓN CULTURAL Y LA ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN LAS CIENCIAS NATURALES	167
Las ciencias naturales y el modo de producción capitalista	167
La revolución cultural y las ciencias naturales	171
Algunos planteamientos teóricos	177
Algunos comentarios operativos	182
Vietnam	184
La Facultad de Ciencias de la UNAM y la ciencia popular	185

ALGUNOS TÓPICOS SOBRE LO FORMAL Y LO INFORMAL EN LA UNIVERSIDAD CONTEMPORÁNEA	189
Política organizativa, cambio rápido y obsolescencia	189
Comunidades de aprendizaje, práctica y ayuda mutua	192
Sobre el caos y su control	194
La lucha del pueblo vietnamita	196
Algunas actividades informales en la universidad	197
Bibliografía	198
CIENCIA: CRISIS DE LA RAZÓN Y SINRAZÓN	199
El antecedente helenístico	202
El racionalismo moderno	204
La Ilustración	207
La matemática del mundo del mañana	209
Sobre la crisis del paradigma dominante	210
La reacción	211
El mundo hoy: cambio rápido, revolución permanente y obsolescencia	212
¿Desaliento o esperanza?	214
Las culpas	215
Complejidad y cambio posible	217
Conclusión	221
Bibliografía	222
PATRONES Y PROCESOS EN LA NATURALEZA. LA IMPORTANCIA DE LOS PROTECTORADOS	223
No hagas nada sin protección	224
Un par de ejemplos	227
Algo se ha roto...	228
Autoorganización	230
Zona crítica	231
Evolución, estabilidad, conflicto	232
ESPACIO, MOVIMIENTO Y CAMBIO EN LAS CIENCIAS Y LAS ARTES	235
Espacio y tiempo en la física contemporánea	235
El espacio y el tiempo en la vida diaria y en la física clásica	235
Einstein, la relatividad especial, las geometrías no euclidianas y las fuerzas gravitacionales	236
Espacio y tiempo en las artes plásticas	239
Una perspectiva del espacio y el tiempo en las artes plásticas	241
Comentarios finales	251
Referencias	251

COMPLEJIDAD EN COMPORTAMIENTOS UNIVERSALES EN LAS ARTES Y EN LAS CIENCIAS	253
Planteamiento	253
Fenomenología	254
Modelos	265
Discusión	267
Epílogo	270
Bibliografía	271
 COMPLEJIDAD, CRITICALIDAD Y HUMANISMO CREATIVO	 273
Complejidad	273
Genericidad y especificidad	275
Criticalidad	276
Crisis de la razón	279
Lo genérico de las crisis y de las revoluciones	283
Humanismo y éticas	284
Humanismo creativo	284
Heterogeneidad de las redes sociales y comunidades de aprendizaje y práctica	287
Perspectivas en la física	288
 COMPLEJIDAD, SISTEMAS DE SALUD Y CALIDAD	 291
Los problemas y su aproximación	292
Complejidad, multiescalas y el binomio eficacia-eficiencia	292
Fenómenos críticos, robustez y adaptabilidad	294
Peligro-oportunidad	295
Los hilos de continuidad y la herencia a la que renunciamos	296
Por la ruta de la complejidad	296
Comunidades de práctica y ayuda mutua: la problemática del primer nivel en el sistema de salud.	297
Comentarios finales	299
 ALGUNOS ASPECTOS DE LA INTERRELACIÓN CIENCIA-SOCIEDAD EN LA OBRA CIENTÍFICA DE EINSTEIN	 301
Resumen	301
Introducción	301
Einstein en Suiza	302
Einstein en Alemania	304
 CIENCIA, SOCIEDAD E IDEOLOGÍA EN EL CAPITALISMO	 309
1. Algunas características globales del capitalismo contemporáneo	309
2. Algunas características de la sociedad futura	316

EL SIDA, AZOTE DEL TERCER MUNDO, O HACIA LA BÚSQUEDA DE NUEVAS TERAPIAS CONTRA EL SIDA	331
ENFERMEDADES COMPLEJAS, “UN PUENTE” ENTRE PARADIGMAS	339
Introducción	339
Concepto	340
Problema de salud pública	341
Algunos fundamentos de la transmisión hereditaria	342
Niveles de estudio y enfoque predominante	343
Diabetes tipo 2 y obesidad como ejemplo de enfermedades complejas	343
Posible enfoque y nuevas herramientas	345
Teoría de redes	346
La red externa, sistemas de salud y usuarios	346
Comunidades de práctica	347
Bibliografía	348
LA ESTRUCTURA DE CORRELACIONES LOCALES DEL ADN Y SUS PARÁMETROS TERMODINÁMICOS	351
1. Introducción	351
2. El ADN	352
3. La energía libre	353
4. La distribución de los dímeros en el ADN	354
5. Reglas de suma	355
6. Resultados y discusión	356
7. Conclusiones	359
Referencias	360
APROXIMACIONES DE LA FÍSICA HACIA EL SIDA	361
1. Introducción	361
2. Tropismo infeccioso y estructura viral	363
3. La infección como sistema dinámico	366
4. Sida y género	368
Referencias	371
HILOS DE CONTINUIDAD Y CAMBIO: NUEVOS PUENTES Y VIEJAS CARGAS	373
Permanencia cambiante	373
Cambio permanente	376
Bibliografía	384

HACIA UNA PEDAGOGÍA DE LA COMPLEJIDAD: RESPONSABILIDAD SOCIAL, PENSAMIENTO CRÍTICO Y SISTEMAS COMPLEJOS EN LA EDUCACIÓN CIENTÍFICA	387
Introducción	387
Antecedentes históricos	387
Desafíos y trabajos contemporáneos	389
Implicaciones y discusiones teóricas desde las prácticas	390
Reflexiones concluyentes	392
Agradecimientos	393

⊙ *Esta es una página en blanco.* ⊙

PRÓLOGO

La primera invitación que recibí para escribir un prólogo para este libro, dedicado al Dr. Germinal Cocho Gil, me sorprendió no sólo por su generosidad sino porque las ciencias en las que él ha trabajado y alcanzado su actual excelencia y prestigio, y aquellas en las que yo me he ocupado, realmente tienen pocos puntos de contacto. Mi sorpresa aumentó todavía más cuando leí el contenido de este volumen, que es una amplia colección de textos que ejemplifica la amplitud y heterogeneidad de temas que abarca el campo de la complejidad. Yo ya había tenido breves contactos con uno o más de ellos, gracias a algunas (pocas) reuniones del Seminario de Problemas Científicos y Filosóficos de la UNAM, en las que el Dr. Germinal Cocho Gil y algunos de sus colegas disertaron sobre la complejidad, sus alcances y su contenido. De manera que la mencionada invitación no podía deberse a mi remota relación con el tema. Pero había otra razón para pedirme que yo escribiera el prólogo de este libro, y es que yo conocí al Dr. Germinal Cocho Gil desde hace muchos años, cuando él era un joven estudiante universitario, y he mantenido con él una cordial amistad, aunque con encuentros menos frecuentes que los que yo hubiera deseado. El breve relato de esa relación es entonces el contenido de este prólogo.

Nuestro primer encuentro fue a fines de los años cincuenta del siglo pasado, o sea hace unos 60 años. Ocurrió en el seno de la UNAM, en lo que entonces era la nueva Facultad Nacional de Medicina (acababa de dejar de ser Escuela). Yo entonces ya era profesor de anatomía patológica en el tercer año de la carrera, y en mi grupo se inscribió el alumno Adonis Germinal Cocho Gil, a quien sus amigos llamaban 'Germi'. Era un buen estudiante, pero se distinguía de todos los demás muchachos por su fuerte y casi endiabladamente cerrado acento español. En esos tiempos yo dirigía la Unidad de Patología de la Facultad de Medicina, en el Hospital General de México, e invitaba a los alumnos interesados a trabajar algunas de sus horas libres en mi laboratorio durante el curso. Un amigo muy cercano de Germi era otro estudiante llamado Elías Amador, y ambos se encontraban en el grupo que solicitó incorporarse a los trabajos mencionados, que incluían la realización de autopsias de pacientes fallecidos en el hospital y el estudio anatómico (macro y microscópico) de sus órganos, así como el de las piezas quirúrgicas que los cirujanos enviaban para su diagnóstico microscópico.

Germi trabajó conmigo durante los tres últimos años de su carrera y escribió su tesis de graduación profesional junto con Elías Amador, basada en un estudio experimental sobre fisiología renal. Pero durante todo ese tiempo el interés real

de Germi no era la medicina sino la física, o como él decía, los “eleshtronesh”. Después de graduarse como médico, Germi empezó a estudiar lo que realmente quería aprender (física y matemáticas) en la Facultad de Ciencias de la UNAM, y después en la Universidad de Princeton, en los Estados Unidos, donde se doctoró en física. Regresó a México y se incorporó a su facultad como profesor de física y matemáticas, y como investigador del Instituto de Física, iniciando así la brillante carrera que iba a convertirlo, a lo largo de los años, en lo que hoy todos le reconocemos y admiramos, y que ha sido la motivación para dedicarle este volumen. Germi no olvidó la medicina, y varios de sus proyectos de investigación se han ocupado de problemas biomédicos, al mismo tiempo que de la complejidad. Actualmente es Investigador Emérito en la UNAM, institución que acaba de inaugurar su Centro de Ciencias de la Complejidad, otro producto más del interés y del trabajo de Germi.

Por todo lo anterior, me complace terminar este prólogo con mi felicitación y un gran abrazo para mi buen amigo:

¡FELICIDADES, GERMI!

Ruy Pérez Tamayo

INTRODUCCIÓN



Germi en el homenaje póstumo a Richard Levins, febrero de 2016.

TRADICIÓN e innovación son polos ineludibles tanto en el proceso de investigación como en el de enseñanza-aprendizaje; considerados en su conjunto representan una unidad que alude a la contradicción profunda o por lo menos a una cierta lucha de contrarios. Se podría decir que dicha dialéctica se condensa en las *figuras de oxímoron* que van de la innovación tradicional a la tradición innovadora, en una tensión dinámica que fue calificada por Thomas Kuhn como la *tensión esencial*. Todo esto viene a cuento porque los materiales aquí reunidos están impregnados de esa visión heterodoxa y no dicotómica en la que se ha gestado y procesado la riqueza del pensamiento de Germinal Cocho Gil, científico incansable, ávido de conocimiento y poseedor de una cultura universal; el propósito de este libro es compartir con un público amplio diversas reflexiones científicas, filosóficas y sociales generadas alrededor de su pensamiento.

Esta compilación representa la culminación de varios esfuerzos para reunir textos de la autoría individual o colectiva de Germinal, y en donde se puede apreciar esa tradición innovadora cuya influencia perdura por ya más de cuatro décadas.

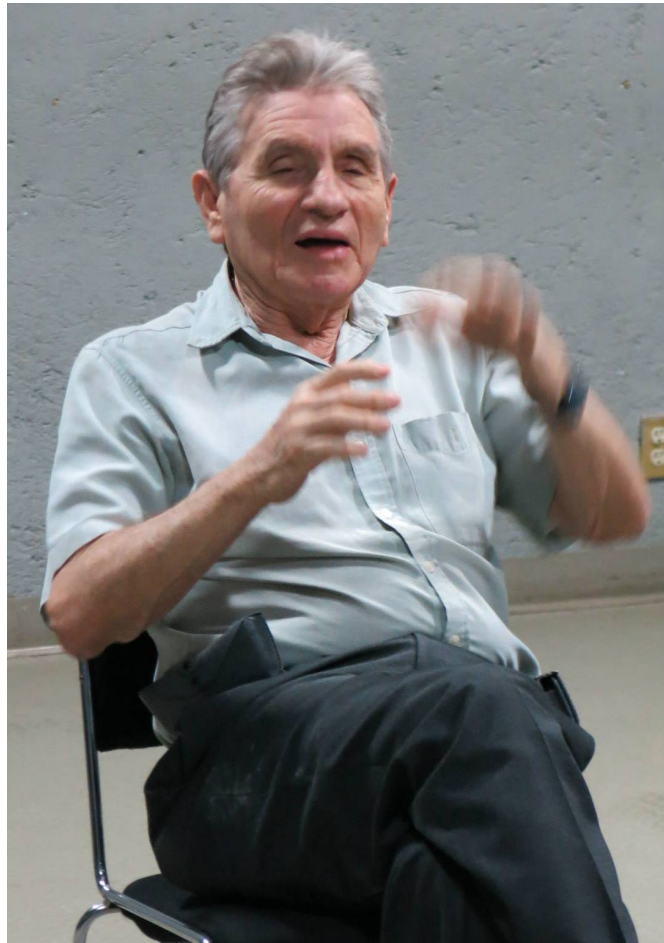
Quien se acerque a este libro se dará cuenta que no hay una secuencia ni cronológica ni temática, porque consideramos que el hacerlo implicaría introducir un sesgo clasificatorio; así, pues, ha sido el azar quien ha determinado el orden final en que se presentan los textos. La sugerencia es leerlos al modo en que Julio Cortázar indicaba se leyera su obra *Rayuela*, y en la que la curiosidad de cada lector lo lleva por rutas *sui generis*. El lector, sin embargo, no se confunda en pensar que ese *orden* es un *desorden*. Las ideas de *Germinal*, así como su pensamiento innovador y original, conectan, unifican y permean perfectamente cada uno de los capítulos, se lean en el orden en que se lean.

Médico de formación, físico de vocación y pionero a nivel nacional e internacional en el desarrollo de las ciencias de la complejidad, a través de su trabajo, *Germinal* Cocho nos permite asomarnos a lo que son los procesos creativos, siendo una virtud mayor de su pensamiento la imaginación; es un artífice de la analogía, borra fronteras y tiende puentes entre disciplinas. Sus trabajos se enfocan a la génesis de problemáticas, desde donde se plantean soluciones y se esbozan visiones. En Cocho, la sorpresa es la norma y una cualidad reiterativamente sorprendente es la de plasmar una síntesis coherente a partir de la heterogeneidad de la realidad que nos rodea, ya sea a través del empleo de heurísticas o mediante deducciones que parten de indicios.

En los trabajos aquí reunidos aparece de manera recurrente, y como punto de partida, la forma de abordar interrogantes a la usanza de la física, para eventualmente dar lugar al pensamiento complejo, valiéndose de la metáfora y la analogía, y hasta de la poética. Cocho visualiza su entorno en constante cambio, sujeto a contradicciones, su análisis es dialéctico. Una constante del mismo es la evolución continua, el cambio permanente.

En el ámbito de la física, los problemas tratados en esta compilación están ligados al origen del universo, la termodinámica fuera del equilibrio y muy en particular los fenómenos críticos, donde la física da muestras de complejidad. En los trabajos de biología, la evolución es un hilo conductor, se estudia el origen de la vida, la termodinámica de la materia viva, y la estructura y evolución genéticas. La conexión con la medicina es inmediata: se incluyen estudios sobre el VIH y el SIDA, a nivel de evolución de secuencias genéticas y de inmunología; enfermedades emergentes complejas tales como la diabetes son consideradas. Con frecuencia, lo anterior está entrelazado mediante consideraciones organizacionales sobre el sistema de salud pública. Cocho considera el análisis de la relación medicina/salud prioritario, y sugiere que más que hablar de enfermedades la atención debe recaer en los enfermos. Basta considerar su recurrente uso de la frase de Claude Bernard: "No hay enfermedades, hay enfermos". A nivel filosófico, las dicotomías orden/desorden, continuo/discreto, determinista/aleatorio son constantemente analizadas, cuestionadas y, muchas veces, puestas en perspectiva. Fractales, caos, complejidad y no linealidad aparecen en múltiples contribuciones. Cocho habla, por ejemplo, del "ruido creador" y hace mención de una frase atribuible al físico, matemático A. N. Kolmogorov: "Los fenómenos aleatorios a gran escala, en su acción colectiva, crean una regularidad no aleatoria estricta".

En los textos de Cocho, conceptos y fundamentos conducen al planteamiento de soluciones concretas a problemas específicos y a la formulación de interrogantes para acciones futuras. No es aventurado catalogar este libro como una obra de filosofía natural, con elementos didácticos que anuncian una posible pedagogía de la complejidad, y donde el compromiso social es primordial pues echa mano del pensamiento crítico. En las páginas de este volumen la transdisciplina aparece como *modus operandi*, las ciencias y las humanidades van de la mano para demandar y articular colaboraciones y reencuentros necesarios, a distintos tiempos y en diversos lugares, confluyendo en lo que podría llamarse humanismo creativo. A través de la lectura de este volumen se perfila lo que es el enfoque de los sistemas complejos. Nociones y características de un sistema complejo emergen de la lectura activa de las siguientes páginas.



Germinal Cocho (n. 1933).

Las contribuciones de Cocho que aquí se presentan son el resultado de su participación en variedad de foros de discusión, ponencias magistrales, compendios temáticos, revistas de difusión y de docencia. Desde luego, una componente primordial de su obra se encuentra en la literatura científica internacional, pero su no inclusión obedece a que están destinados a públicos más especializados, y, además, a que esta compilación no es exhaustiva; en esa medida se ha dejado la puerta abierta para agrupaciones futuras que den continuidad a esta iniciativa.

La mancuerna enseñanza/investigación es recurrente, impulsada por la fértil tensión dinámica a que aludimos inicialmente. Los temas tratados van de la medicina, biología, física, química y matemáticas a la filosofía, la sociología y el arte, con una visión integradora que sorteas de maneras múltiples las fronteras disciplinares. Y puesto que la dedicación de Germinal a la formación de jóvenes es otra de sus actividades fundamentales, ello se aprecia, de nuevo en forma explícita, en algunos de los ensayos aquí reunidos o diseminado a lo largo de los escritos.

Sea como tema *ex profeso* o en forma implícita, a lo largo y ancho del volumen las relaciones ciencia y sociedad son continuamente analizadas, esto con miras a la generación de propuestas concretas encaminadas hacia la construcción de la justicia social; de entre ellas, es importante mencionar el desarrollo de “comunidades de aprendizaje, práctica y ayuda mutua”. Varias de sus ideas parten de los debates filosóficos sobre las revoluciones científicas para extraer implicaciones sobre las crisis sociales, la organización del trabajo científico y los desafíos que nos interpelean incesantemente. Este aspecto es tan relevante que puede decirse que diseñar vías de tránsito hacia esa justicia social es la principal meta en la vida de Cocho, y en la que se consideran tanto las restricciones estructurales, las dinámicas antagónicas, las voluntades escépticas y las reflexiones esperanzadas, ancladas todas ellas en la teorización utópica/distópica y en la experiencia histórica.

Finalmente, esperamos que con la publicación de este libro se pueda apreciar la chispa creadora, innovadora –a contracorriente del pensamiento dominante–, valiente, y en no pocos casos irreverente, visionaria y socialmente comprometida de a quien cariñosamente y con admiración llamamos *Germi*.

Eduardo Vizcaya Xilotl, CDMX
Gustavo Martínez Mekler, Cuernavaca
Octavio Miramontes Vidal, Madrid

DINÁMICA DE LA MATERIA COMPLEJA VIVA *

INTRODUCCIÓN

ALO LARGO de su historia la física, como comúnmente la conocemos, se ha ocupado del estudio de la estructura y dinámica de la materia mediante un enfoque lineal y reduccionista. Durante buena parte del siglo XX, se desarrolló la teoría atómica de la estructura de la materia y se introdujo la mecánica cuántica dando origen a campos tales como la física nuclear y la física de partículas. Pero en los albores del siglo XXI cobró fuerza una nueva disciplina que se concentra en un tipo enteramente distinto de investigación fundamental: la investigación de los fenómenos que son demasiado complejos como para ser analizados directamente bajo la simple aplicación de las leyes fundamentales de la física tradicional. Los físicos de esta nueva generación, trabajan en la frontera entre lo aparentemente misterioso y lo ya entendido: la frontera de la complejidad. En esta frontera lo común no es el reduccionismo sino la emergencia. Los fenómenos complejos emergentes de ninguna manera violan las leyes microscópicas; pero tampoco surgen como meras consecuencias lógicas de tales leyes. El convincente principio de emergencia es un fundamento filosófico de la ciencia moderna y representa una desafiante frontera abierta para los físicos. Esta frontera de la complejidad es por mucho, “el área con el mayor crecimiento en la física de hoy” [1].

La complejidad es el objeto de estudio de la ciencia de los sistemas complejos. Se estudia con un enfoque interdisciplinario e integrador y una metodología enteramente nueva, basada en la dinámica de fenómenos no lineales que incluyen métodos matemáticos novedosos. Se interesa por el estudio de fenómenos naturales tales como la turbulencia, el caos,¹ los fractales, la autoorganización, la dinámica espacial y la formación de patrones. Se aplica en física de fluidos, física-química, mecánica clásica, mecánica cuántica, etc.; pero se interesa también en los fenómenos que surgen en la biología, en la economía, en las ciencias políticas, etcétera. Se

* Ensayo escrito por Octavio Miramontes Vidal y Germinal Cocho Gil. Publicado en: Récamier, J. y Jáuregui, R. (eds.), 2002. X *Escuela de Verano de Física. La visión molecular de la materia*, Cd. de México, julio 15 - agosto 3, 2002, UNAM-UAEM.

¹ El caos determinista es un régimen dinámico caracterizado por fluctuaciones temporales aparentemente erráticas, que no son generadas por mecanismos aleatorios sino por una regla, una función o un proceso dinámico determinista. Se dice también que los sistemas caóticos poseen sensibilidad a las condiciones iniciales, lo cual quiere decir que trayectorias de estos, inicialmente muy cercanas, se separan con el tiempo, volviendo imposible una predicción a largo plazo. Véase: Gleick, J. (1987), *Chaos*. Vintage Books: London.

interesa, en pocas palabras, por el estudio de la materia que por tener propiedades complejas recibe el nombre de *materia compleja* y en ella se incluyen manifestaciones de la materia con propiedades tales como la vida y el cómputo emergente entre muchas otras más.

¿Cómo surge la materia compleja? La materia tiene una clara tendencia hacia la evolución de expresiones complejas. Desde su origen, en una posible explosión cosmogónica, la materia formó los componentes elementales de su existencia que conocemos como átomos. En un proceso que ha durado millones de años, la materia ha formado desde átomos y moléculas hasta seres vivos (tanto en la Tierra como posiblemente en otros confines del Universo), algunos de estos seres son *inteligentes* y viven en comunidades, en *sociedades* y en otras formas de *organización social* más compleja (naciones, supra-naciones, etc.). En un cierto momento, en esta cadena evolutiva de la materia, la naturaleza se las ha ingeniado para crear una de sus expresiones más complejas: la materia viva.

ORIGEN Y EVOLUCIÓN DE LA MATERIA VIVA

¿Qué es la materia viva o qué es la vida? Esta pregunta es tan difícil de responder como lo es en sí la complejidad del sujeto que trata de definir. Muchos pensadores han dedicado una buena parte de su energía intelectual a la búsqueda de una definición precisa. Desde los antiguos griegos hasta el mismísimo Erwin Schrödinger [2-3], uno de los padres de la mecánica cuántica. Antes de discutir posibles definiciones de vida, discutiremos algunos aspectos del origen de la materia en sí.

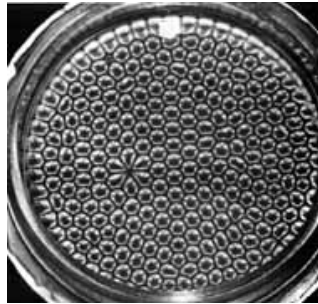


Figura 1: Celdas de convección de un líquido dentro de un recipiente con diferencias de temperatura entre el fondo y la parte superior. Las celdas aparecen como producto de la ruptura de simetría originada por el desequilibrio termodinámico. Este fenómeno de convección existe también en el interior de la Tierra y es la causa de que nuestro planeta tenga un campo magnético producido por la circulación convectiva del magma fluido.

Cuando calentamos una olla con agua sobre una estufa y una vez que se encuentra caliente, agregamos las lentejas (¡claro que queremos hacer una sopa!), podemos ver que estas pequeñas semillas se mueven de arriba hacia abajo, arrastradas por un movimiento oscilatorio conocido como convección. Antes de encender la estufa y de aplicar calor, tal movimiento no existía. Este movimiento, que es un

nuevo orden espacial, surge debido a que el sistema (el agua) ha recibido energía y se encuentra en desequilibrio termodinámico. Este nuevo orden es emergente y surge tras lo que llamamos un “rompimiento de simetría”. Este ejemplo simple ilustra tajantemente la capacidad creativa de la naturaleza: nuevas estructuras emergen debido al desequilibrio termodinámico del universo en expansión y esta característica es el motor fundamental que da origen a las múltiples expresiones de la materia que vemos a nuestro alrededor, incluyendo una de sus manifestaciones más complejas: la materia viva.

UN UNIVERSO EN EXPANSIÓN

En los años veinte del siglo XX, Edwin Hubble usó su telescopio del observatorio de Mount Wilson en California para detectar estrellas variables en las nebulosas. Hubble pudo determinar las distancias de las galaxias y la velocidad relativa a la que éstas se movían con respecto a la Tierra, descubriendo así que las galaxias más lejanas eran las que más rápido se alejaban, en otras palabras, el Universo se encontraba en expansión. Este descubrimiento, junto con el hallazgo posterior de la llamada radiación fósil de fondo, puso en evidencia que el Universo se originó muy posiblemente en una violenta explosión hace aproximadamente entre 12 y 14 mil millones de años. Esta explosión creó la materia tal como la conocemos hoy en día, es decir, formada por átomos que a su vez están formados por una numerosa familia de partículas elementales.

Una vez que la temperatura del universo fue lo suficientemente baja, la materia pudo condensarse para formar nubes de gases, es decir, las estructuras que forman el universo: estrellas, galaxias, nebulosas. Dentro de cierta clase de estrellas se dio –y se sigue dando– un proceso llamado nucleosíntesis, mediante el cual los átomos más ligeros se fusionan entre sí para formar átomos de mayor número atómico, dando lugar incluso a moléculas de gran complejidad estructural.

Alrededor de hace 4.5 mil millones de años, se originó el sistema solar, posiblemente tras la condensación de nubes de gas y polvo. La Tierra solidificó y su distancia al Sol permitió, en un cierto momento de su historia, la aparición de agua en forma líquida. Entretanto, en la vastedad del Universo, los procesos químicos continuaron su marcha para formar una gran variedad de moléculas orgánicas teniendo como componente principal al carbón, al hidrógeno, al oxígeno y al nitrógeno. Las investigaciones más recientes han permitido establecer la clara presencia en el medio interestelar de moléculas tales como agua, alcoholes, amoníaco, ácidos e incluso moléculas orgánicas formadas por 13 átomos.

La evolución química de estas moléculas orgánicas las llevó hasta un grado de complejidad estructural tal, que adquirieron las propiedades mínimas de la materia compleja prebiótica: las propiedades de autocatálisis que permitieron a estas moléculas participar en su propia síntesis y reproducción.

La formación de materia compleja requiere, presumiblemente, de condiciones especiales para que las moléculas de creciente complejidad no sean destruidas por las condiciones hostiles de los medios interestelares. Partiendo de esta premisa, en

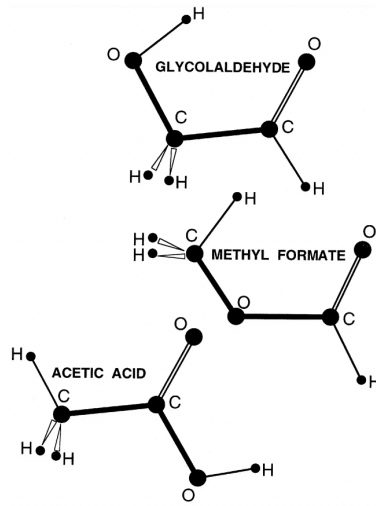


Figura 2: En el año 2000, la molécula de glycolaldehído (CH_2OHCHO) fue descubierta en emisiones de radio en las cercanías del centro de la galaxia Sagittarius. Esta molécula (y sus formas isoméricas: metil-formato y ácido acético) es de gran importancia como precursora de la materia viva, pues constituye la primera especie de azúcar monosacárida detectada fuera de la Tierra. Esta es una molécula de 9 átomos y hasta el momento se han descubierto especies químicas de hasta 13 átomos.

los años cincuenta del siglo XX, el químico Stanley Miller ideó un mecanismo muy simple para, partiendo de componentes moleculares simples, sintetizar en el laboratorio moléculas orgánicas complejas bajo condiciones climáticas no-extremas que supuestamente existirían en la Tierra antes del surgimiento de la vida.

Tales experimentos dieron como resultado diversas especies químicas fundamentales para la vida; pero de manera más importante, mostraron cómo mecanismos simples pueden generar moléculas complejas. De hecho, desde hace algunos años, se ha encontrado entre la composición química de algunos meteoritos la presencia de las mismas moléculas –y casi en la misma proporción– generadas por el experimento de Miller. Recientemente, sin embargo, se han logrado sintetizar moléculas orgánicas de gran complejidad bajo las condiciones extremas del medio interestelar. Por ejemplo, en marzo del 2002, científicos del laboratorio Ames de la NASA, lograron la síntesis de varios aminoácidos (los componentes fundamentales de las proteínas) tras iluminar con rayos ultravioleta bloques de hielo que contenían varias moléculas simples, similares a las empleadas por Miller [5]. Este importante descubrimiento abre las dos siguientes posibilidades: 1) los componentes prebióticos que participaron en la formación de la vida en la Tierra bien pudieron haber provenido del espacio exterior, y 2) la existencia de materia viva en el Universo es un fenómeno mucho más extendido de lo que antes imaginábamos. *De hecho, la vida sería una propiedad emergente esencialmente inevitable en la evolución de la complejidad de la materia.*

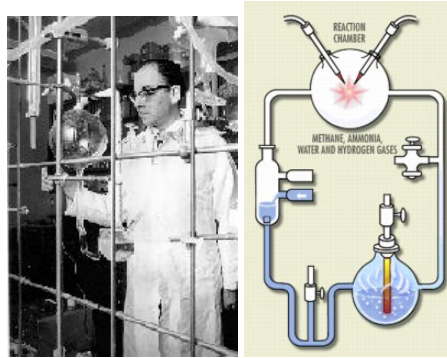


Figura 3: A comienzos de los cincuenta, Stanley L. Miller, trabajando en los laboratorios de Harold C. Urey en la Universidad de Chicago, realizó los primeros experimentos diseñados para identificar las posibles reacciones químicas que ocurrieron en la Tierra primitiva. En el matraz de vidrio situado en la parte baja, Miller “creó” un “océano” de agua que, cuando calentada, forzaba al vapor de agua a circular a través del aparato. El matraz de arriba contenía una “atmósfera” que consistía de metano (CH_4), amoníaco (NH_3), hidrógeno (H_2) y el vapor de agua circulante. A continuación expuso los gases a una descarga eléctrica continua para simular las tormentas eléctricas atmosféricas, provocando la reacción de los gases. Los productos solubles en agua, pasaban por un condensador y se concentraban en el agua del recipiente inferior. El experimento dio como resultado la síntesis de moléculas complejas tales como aminoácidos, que son componentes fundamentales de la materia viva.

La evidencia fósil más antigua que conocemos indica que la vida apareció en la Tierra, hace aproximadamente 3.8 mil millones de años. Para ese entonces, la materia viva tenía el rostro familiar de estructuras autocontenidas en membranas, en cuyo interior existía un medio aislado rico en materia orgánica de un enorme grado de complejidad molecular. Esta maquinaria molecular era capaz de autorreplicarse y de metabolizar capturando energía del medio ambiente circundante. En pocas palabras, los primeros organismos vivos, genuinos representantes de la materia compleja viva, deambulaban por la Tierra. Pero ¿solamente en la Tierra?

Cada vez tenemos mayor evidencia sobre la posible existencia de materia compleja viva en el Universo. Se han encontrado más y más sistemas planetarios distintos al sistema solar en otras partes de la galaxia [6] que pueden potencialmente tener condiciones adecuadas para el surgimiento de materia viva. Otras evidencias provienen de nuestro propio sistema solar, como es el caso de la luna Europa del planeta Júpiter donde, al parecer, existe agua líquida [7]. Finalmente, nuevas evidencias sugieren la existencia de agua en Marte, así como posibles formas de vida microscópicas en meteoritos de origen marciano (fig. 4) hallados en la Tierra [8].

Provenientes del medio estelar, o bien, de origen terrestre, las primeras moléculas complejas pasaron por millones de años de evolución hasta dar origen a las formas de vida que hoy conocemos en la Tierra. En ese proceso, algunas propiedades de la materia dieron lugar a nuevos y más sofisticados niveles de complejidad. Una de estas propiedades es la capacidad de autoorganización.

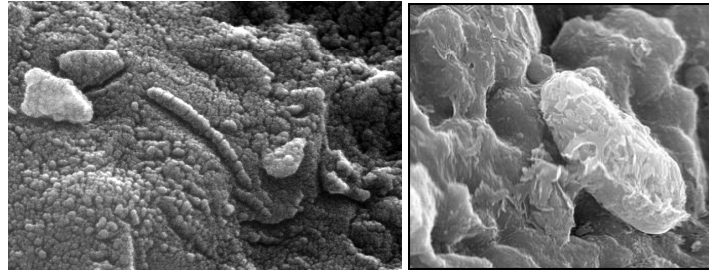


Figura 4: Fotografías de microscopio electrónico que muestran estructuras elongadas que podrían ser formas de vida fosilizadas en un meteorito procedente de Marte, con una antigüedad de alrededor de 700 millones de años. (Fuente: NASA).

LA AUTOORGANIZACIÓN

La complejidad está relacionada con las propiedades que emergen de las interacciones entre varios elementos similares y con la generación espontánea de orden, que se manifiesta en varias escalas temporales y espaciales diferentes a aquella en la que ocurren las interacciones. Este orden, además, emerge sin la intervención de un control central o de un plan predefinido, ya sea en el diseño estructural de los elementos, o codificado en los mecanismos de interacción. Este nuevo orden puede acompañarse de conductas colectivas altamente organizadas, aun en la ausencia de diseños prefijados.

La autoorganización se manifiesta en múltiples niveles de organización de la materia, desde la autocatálisis molecular hasta la dinámica de sistemas galácticos, pasando por procesos como la memoria distribuida del cerebro o la conducta social. Uno de los ejemplos más estudiados es la formación de patrones espaciales del tipo ondas espirales.

Uno de los fenómenos más difundidos en la naturaleza es la manifestación de procesos sociales, donde los elementos individuales participan para dar lugar a conductas cooperativas y colectivas. La conducta social en cualquier organismo, incluyendo a los humanos, es un fenómeno biológico autoorganizado. Las sociedades de insectos, por ejemplo, se basan en la existencia de unidades sociales (individuos) que interactúan entre ellos para producir una conducta global y emergente [8-9]. De hecho, la comprensión cabal de la conducta social como el producto colectivo de interacciones individuales es, sin duda, uno de los grandes retos del estudio de la materia compleja autoorganizada. Obviamente, la conducta social no puede ser reducida a la conducta individual de los participantes debido a que los individuos en aislamiento no la producen. La conducta social es por lo tanto sinérgica² y sólo la produce la participación concurrente de individuos en interacción.

² Hermann Haken (1927-) introdujo el término *sinérgica* para referirse al estudio interdisciplinario de los sistemas compuestos por muchas partes individuales y que pueden producir estructuras espaciales o temporales de una manera autoorganizada. Véase: Haken, H. (1986), *Fórmulas de éxito en la naturaleza. Sinérgica: la doctrina de la acción en conjunto*. Barcelona: Salvat.

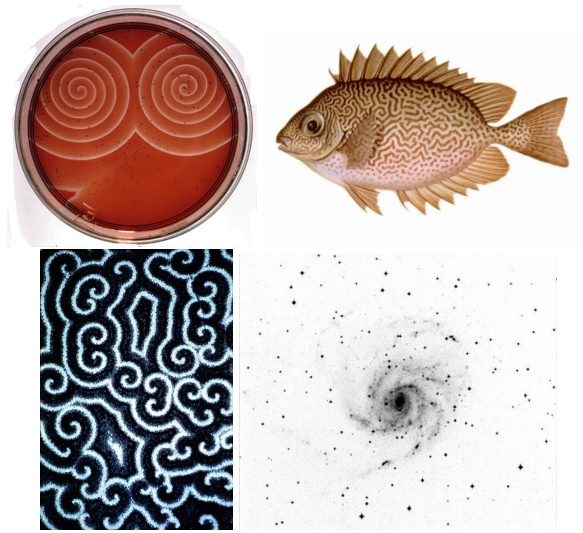


Figura 5: Ejemplos de patrones espaciales autoorganizados en forma de ondas espirales. Desde una reacción química en una caja de petri conocida como reacción Belousov-Zhabotinsky, hasta la dinámica de millones de estrellas en una galaxia, pasando por los patrones de coloración en la piel de los animales y un ejemplo de patrones de movimiento de la amibas *Dictyostelium*.

Es necesario tener en cuenta que no toda agregación de individuos es necesariamente social. La conducta social sólo se expresa si los individuos pueden comunicarse entre sí y pueden modificar sus conductas individuales como consecuencia de tal comunicación (¡un conjunto de insectos nocturnos alrededor de un foco no es una colonia!). La conducta social tiene mucho que ver con expresiones de cooperación en el sentido de que uno o más organismos sociales pueden hacer algo juntos, es decir, si dos o más individuos pueden mantenerse reaccionando unos frente a los otros y pueden mantenerse realizando alguna tarea con un fin común. Las hormigas, por ejemplo, cumplen perfectamente con la descripción anterior. No importa que las hormigas como individuos puedan ser simples o tener un limitado repertorio de conductas. La colonia como un todo es una estructura altamente integrada y este orden, a este nivel, proviene de las interacciones masivas y coordinadas que son facilitadas por la existencia de canales efectivos de comunicación. La conducta social puede verse, por lo tanto, como la consecuencia inevitable de estructuras interconectadas y debe considerarse como una propiedad robusta y genérica de los sistemas complejos ya sean naturales o artificiales. ¿Inevitable, puede esto ser posible? Al referirse a los múltiples y sorprendentes ejemplos de conductas emergentes en las sociedades de hormigas, Edward O. Wilson, uno de los biólogos de la conducta más importantes del siglo XX, afirma que:³ “nos dan una idea de por qué

³ Wilson es autor, junto con B. Hölldobler, de uno de los tratados más importantes de la biología

la sociabilidad es tan exitosa en términos evolutivos... este éxito se ha expresado por lo menos doce veces en la evolución de los insectos de manera independiente y podemos por ello pensarla como si se tratase de un *atractor biológico*".⁴ La sociabilidad, en términos aún más amplios, ha surgido independientemente y de múltiples maneras en la evolución de los organismos, desde las expresiones más rudimentarias en las colonias de bacterias, hasta las sociedades humanas. Debido a ello, *pareciera que el surgimiento del fenómeno social en la evolución de la materia, fuese inevitable de la misma manera que lo es, por ejemplo, la aparición en varias ocasiones y de manera independiente de órganos tales como los ojos y por ello se habla de atractores biológicos*.⁵ En lo que respecta a los sistemas artificiales, las propiedades colectivas surgen de manera inevitable y son de hecho, atractores de la dinámica en dichos sistemas.

EL BORDE DEL CAOS: MOTOR DE LA CREATIVIDAD

Un número creciente de estudios teóricos muestran que los sistemas conformados por una cantidad de elementos similares bajo interacción, exhiben una gama muy rica de conductas dinámicas complejas cuando se encuentran en las cercanías de una zona de transición entre estados ordenados y estados desordenados (las llamadas transiciones de fase orden-desorden) [10]. Los sistemas demasiado desordenados (caóticos) o demasiado ordenados que no sustenten, por mencionar un ejemplo, capacidades de procesamiento de información, que en el caso de la organización social de las hormigas resulta claramente esencial. Veamos esto con más cuidado. Pensemos en un gas y pensemos en la capacidad de que tal medio sea capaz de almacenar algún tipo de información. No será difícil imaginar que la volatilidad y desorden intrínseco de un medio gaseoso no garantizaría el almacenamiento de volúmenes de información con gran éxito. En contraste, un sólido con estructura regular se antoja mejor para ello por ser una estructura permanente y ordenada. Pensemos, por otra parte, en otro aspecto esencial de todo proceso informático: el flujo de datos. ¿Podríamos imaginar cuál de los medios resultaría más adecuado para el movimiento de datos? El medio gaseoso se antoja superior, en contraste con la rigidez de una estructura ordenada. El problema es que ambos extremos de orden y desorden no garantizan las dos condiciones, almacenamiento y movilidad, de manera simultánea. ¿Y que tal algo intermedio, resultará mejor? Los estudios teóricos apuntan a que los sistemas en los que el orden y el desorden

de hormigas (*The Ants* (1991), Berlin: Springer-Verlag), pero es aún más conocido por estar en el centro de una de las controversias más importantes de la biología en los últimos tiempos y que se conoció, en la década de 1970, como "el debate sociobiológico". Según Wilson y sus seguidores, muchas de las características de la conducta animal están determinadas genéticamente. Esto pareciera aceptable en una primera aproximación, pero deja de serlo cuando se transfiere sin más a los humanos y entonces, el lector puede imaginar, sirve para justificar argumentaciones racistas tales como la "superioridad de los blancos" o cosas similares.

⁴ Véase: Lewin, R. (1997). *Complexity: Life at the edge of chaos*. Phoenix, London.

⁵ El término *atractor biológico* ha sido popularizado por Brian Goodwin, uno de los fundadores de la biología teórica moderna, para referirse a la generación de orden y forma en los organismos. Véase: Varela, F. y Stein, W. (eds.), (1992). *Thinking about biology*. Addison-Wesley.

coexisten resultan los más adecuados para dar sustento a los procesos informáticos emergentes. Tal régimen de coexistencia brinda también mayor capacidad y flexibilidad adaptativa a dichos sistemas. Lo anterior nos hace pensar en que, de hecho, la coexistencia de orden y desorden es una condición fundamental y necesaria para la expresión espontánea de procesos “creativos” en la naturaleza.

El *borde del caos*⁶ es la frontera que separa el orden del desorden. Puede entenderse también como la zona en la que coexisten ambos estados y por lo tanto los sistemas situados en tal balance manifiestan propiedades ligadas a ambos. Sin embargo, lo más interesante no es que manifiesten propiedades compartidas de ambos extremos sino que manifiesten propiedades enteramente nuevas. Una de tales propiedades, por ejemplo, es la aparición de fluctuaciones temporales o espaciales de todos los tamaños posibles del sistema y que hacen posible el que éste explore de manera más efectiva todas las configuraciones o estados disponibles.⁷

FENÓMENO SOCIAL Y SOCIEDADES ARTIFICIALES

La aparición de computadoras digitales, a la par de desarrollos importantes en la teoría matemática de sistemas dinámicos no lineales, han dado lugar a una nueva gama de formalismos para el estudio de fenómenos complejos como lo son los procesos sociales que aparecen, tal vez también de modo inevitable, en la evolución de la materia compleja viva. Tales formalismos matemáticos incluyen a las redes neuronales, a los autómatas celulares y variantes de ellos.⁸

Un ejemplo muy ilustrativo para el estudio de la complejidad existente en fenómenos sociales lo constituyen las colonias de hormigas. Estos grupos formados por cientos, miles o incluso millones de individuos, despliegan patrones de conductas que son claramente autoorganizadas y de escala global, en contraparte con las conductas individuales y simples a nivel de los individuos [11-22].

Entre las decenas de miles de especies de hormigas que existen actualmente en la Tierra, un género resulta sumamente adecuado para estudios de laboratorio: el género *Leptothorax*, cuyas colonias están formadas por grupos pequeños de individuos homogéneos (típicamente alrededor de 50 o 100), en los que la existencia de individuos especiales (reinas) no es tan necesaria para el funcionamiento normal de la colonia. Se sabe que las interacciones entre individuos ocurre a distancias cortas, es decir, “a primeros vecinos”, como nos gusta a los físicos llamarlas. Sabemos por último que los individuos aislados pueden activarse espontáneamente y

⁶ El término *edge of chaos* (*borde del caos*) fue popularizado por Chris Langton cuando estudió sistemas que realizan procesamiento de información de manera emergente. Véase: Langton, C. G. (1990), “Computation at the edge of chaos: phase transitions and emergent computation”, *Physica D* 42: 12–37.

⁷ Véase: “Order for free”, *New Scientist*, 13 February 1993: 10–11, y Ruthen, R. (1993), “Adapting to complexity”, *Scientific American*, January: 110–117.

⁸ Los autómatas celulares y las redes neuronales, son sistemas dinámicos con elementos discretos que interactúan en espacio discreto. Su uso es cada vez más común en la modelación de diversos procesos en la naturaleza, desde la astrofísica, la economía o el funcionamiento de la memoria en el cerebro, entre muchos ejemplos. Véase: Wolfram, S. (ed.) (1986), *Theory and applications of cellular automata: Selected papers 1983-1986*. Singapore: World Scientific, y Amit, D. J. (1989), *Modeling brain function: the world of attractor neural networks*. Cambridge University Press.

que la interacción con hormigas activas puede activar a aquellas que no lo estén. Todos estos ingredientes se pueden introducir como reglas de interacción en modelos para simulación computacional conocidos como autómatas celulares móviles o también conocidos como redes neuronales fluidas. Sin entrar en muchos detalles, describiremos uno de estos modelos como una colonia virtual formada por hormigas que “viven” en una computadora. Se trata de un nido de hormigas formadas por entes virtuales que pueden moverse e interactuar entre ellos.

Las hormigas virtuales muestran una muy rica variedad de conductas colectivas que no han sido especificadas de antemano en su construcción sino que surgen de una manera autoorganizada. Uno de los aspectos de la conducta que surge de esta manera, es el de las oscilaciones periódicas una vez que el hormiguero virtual ha alcanzado una cierta densidad de individuos: ¡oscila espontáneamente! (fig. 7) Este aspecto del fenómeno observado, presente igualmente en las hormigas reales, nos dice mucho sobre el mecanismo preciso que es responsable de generar tales oscilaciones y que no es otro que las interacciones entre elementos, que en lo individual son caóticos y que en lo colectivo se sincronizan para generar un estado dinámicamente coherente. ¿En qué momento se alcanza tal estado de coherencia?

La densidad de hormigas en un hormiguero virtual puede variarse con facilidad y por ello también resulta ventajoso para explorar aspectos que serían muy difíciles de lograr en un experimento con hormigas reales. La densidad, como decíamos, puede variarse a nuestro antojo y podemos entonces medir cosas tales como el número de activaciones espontáneas en función de la densidad. Podemos además medir el grado de orden y de complejidad de nuestras hormigas virtuales usando cantidades tales como la entropía o la complejidad algorítmica. Tales medidas en su conjunto nos dejan ver que existe un pico de máxima complejidad que coincide con el punto de máxima entropía y que marca con exactitud la frontera entre el caos y el orden. Esta frontera ocurre a densidades relativamente bajas, cercanas a un valor de 0.2. Tal densidad se sostiene para un rango relativamente amplio de valores de los parámetros biológicamente relevantes del modelo. Basta decir que tal valor de densidad ha sido comprobado experimentalmente para convencernos de la potencia predictiva de este tipo de modelos.

En efecto, en un experimento llevado a cabo por Nigel Franks y su grupo en Inglaterra, los nidos de varias colonias de hormigas *Leptothorax* fueron manipulados para modificar la densidad en la que se encontraban inicialmente. En tales experimentos se modificaron las fronteras del hormiguero de tal manera que el área de estos pudiera aumentarse o disminuirse. Después de las modificaciones, las hormigas siempre reconstruyeron sus nidos para mantener una densidad relativamente constante con un valor cercano... ¡a 0.2! (fig. 9)

El que los hormigueros reales se encuentren en la densidad que el modelo predice, sugiere fuertemente que las hormigas reales efectivamente autorregulan tanto el área del nido como el número de los miembros de la colonia con la finalidad de, en todo momento, situarse en la frontera entre el orden y el desorden. Lo cual a su vez les permite lograr la mayor plasticidad de conductas, poseer una mayor capacidad informática y que su actividad sea lo menos predecible, entre otras co-

sas. De hecho, debemos entender que la frontera entre el caos y el orden marca también el momento en la cual una sociedad pasa a ser tal. En otras palabras, una densidad baja de individuos hace que la tasa de contacto entre ellos sea tan baja que la colonia debe considerarse más bien como una colección de individuos aislados sin muchas posibilidades de conductas colectivas; mientras que una densidad muy alta implica individuos en una interacción tan fuerte que la dinámica colectiva queda atrapada en un estado demasiado coherente, en el que los individuos podrían verse forzados a hacer todos lo mismo, todos al mismo tiempo. En el borde del caos, los individuos tendrían la flexibilidad suficiente como para verse involucrados en tareas colectivas, pero preservando al mismo tiempo, la expresión de parte de sus conductas individuales.

El uso de un enfoque de sistemas complejos para el estudio del fenómeno social ha dado frutos destacados en años recientes. En el contexto de la dinámica social de las hormigas o de otros insectos sociales, el uso de modelos matemáticos simples muestra que varios de los aspectos de la conducta colectiva son meramente consecuencia de un proceso autoorganizado de interacciones no lineales situado en el borde del caos; que tales conductas son, hasta cierto punto, inevitables y que dudosamente se deben a procesos que deban explicarse mediante el uso de argumentos adaptativos exclusivamente, tal como es la costumbre en la biología de nuestros días, ¡las hormigas virtuales no tienen genes!

El lector estará pensando que esta afirmación amerita un poco más de detalle, no porque sea falsa sino porque tiene consecuencias de primera importancia para una comprensión completa de la biología evolutiva. Discutamos pues este aspecto.

El mundo de las hormigas tiene ejemplos impresionantes y espectaculares de inteligencia colectiva: construcción de meganidos con cientos de millones de individuos en las hormigas japonesas *Formica yessensis*; granjas subterráneas de hongos cultivadas por las hormigas tropicales cortadoras de hojas *Atta* y muchos otros ejemplos más, ¿cómo y de dónde sale todo este orden?, ¿son estas actividades la simple suma de esfuerzos individuales o se trata de propiedades atribuibles a la colonia como un todo?

El debate en torno a estas preguntas es más antiguo de lo que podemos imaginar. Remy Chauvin, uno de los grandes entomólogos sociales franceses del siglo XX, nos narra cómo ya en los primeros años de ese siglo, el biólogo Etienne Rabaud afirmaba que los insectos sociales lo eran sólo en apariencia y eso debido a que una vaga interacción los mantenía juntos. En realidad, afirmaba Rabaud, estos seres viven como si fueran solitarios sin mostrar el más mínimo intento para cooperar con los demás, por lo que una colonia es llanamente un conglomerado de solitarios.⁹ Ya en años recientes, William Hamilton y Richard Dawkins, ambos en la Universidad de Oxford, reformularon esta misma visión, pero esta vez apoyados en la ciencia de la genética. Ellos consideran que los insectos sociales actúan de manera egoísta con la sola finalidad de pasar sus genes a las siguientes generaciones, de tal manera que la evolución, y no sólo la de las hormigas, puede entenderse como un proceso en el que “genes egoístas” intentan pasar hacia el futuro tantas copias de

⁹ Véase: Chauvin, R. (1970), *The world of ants: a science fiction universe*. London: Victor Gollanz LTD.

sí mismos como sea posible. Hamilton y Dawkins argumentan que lo que en realidad vemos en una colonia no es una actividad cooperativa sino el resultado de genes egoístas arreglándoselas ellos mismos, vía la colonia. Todo esto podría tener alguna lógica, sin embargo, no resiste un escrutinio cuidadoso: los genes pueden afectar las conductas de los individuos, pero ¿cómo pueden afectar la conducta de una colonia como un todo?

Brian Goodwin responde esta última pregunta haciendo notar que lo que interactúa en una colonia son individuos y no genes, de la misma manera que en una molécula de agua hay átomos de hidrógeno y oxígeno, pero estos átomos no explican el porqué el agua forma remolinos espirales cuando se va por una coladera. Queda claro que para explicar esta conducta del agua es necesario recurrir a otro nivel de orden y eso es justamente lo que falta en la explicación genética de la conducta social.¹⁰ Los genes, o incluso los individuos, no son suficientes para explicar una conducta que se manifiesta a otro nivel. Las explicaciones basadas en genes, adecuación y selección natural pueden explicar, si acaso, la persistencia de ciertos patrones de conducta, pero no pueden explicar cómo se producen. Es aquí donde el estudio de los sistemas complejos aporta explicaciones sobre la aparición de esos otros niveles emergentes de organización en la materia compleja. Nos da, por lo tanto, acceso a nuevas y más completas explicaciones sobre las verdaderas fuentes de innovación en la evolución de los seres vivos y en los sistemas artificiales que podemos diseñar y construir. Nos proporciona asombrosas y acertadas explicaciones sobre la dinámica de aquellos miles de pies que, al recorrer bulliciosamente los suelos de las selvas y bosques del mundo, marchan como camaradas entre el vaivén del orden y el caos.

¹⁰ Goodwin, B. C. (1998), "All for one...", *New Scientist*, 13 June: 32–35.

Un modelo de dinámica social en hormigas

Una colonia de hormigas *Leptothorax* está formada típicamente por un número pequeño de individuos bastante homogéneos en tamaño y forma. Estas hormigas interactúan haciendo uso de sus antenas para comunicarse con las compañeras que se encuentran en su proximidad inmediata. Las hormigas activas pueden activar a las compañeras que no lo estén o bien aquellas inactivas pueden activarse espontáneamente. Estas sencillas reglas de conducta pueden codificarse en un modelo computacional simple. Cada hormiga virtual se representa como un objeto móvil en una red discreta. En la representación que se muestra en la figura 6, a la izquierda, una hormiga virtual activa es un punto negro, mientras que las hormigas inactivas se representan como puntos blancos marcados con una x. La zona gris representa la zona de interacción de la hormiga activa y esta formada por las ocho celdas que forman la primera vecindad de ese punto. Dentro de esa vecindad, en este caso particular, existe una sola hormiga inactiva con la cual la hormiga virtual activa interactuará en el siguiente paso del tiempo ($t + 1$) activando a la hormiga inactiva. A la derecha de la misma figura 6 se representa esquemáticamente la misma situación descrita.

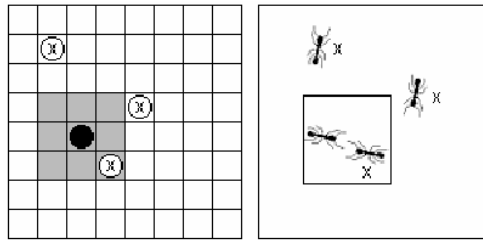


Figura 6

Para cada hormiga virtual se definen variables de estado como posición (x, y) y actividad S . La actividad de una hormiga i en el tiempo t se define como:

$$S_i^t = \tanh \left\{ g \left[\left(\sum_{j=1}^k S_j^{t-1} \right) + S_i^{t-1} \right] \right\}$$

Donde j son las k -hormigas en la vecindad de la hormiga i ; g es la ganancia de la tangente hiperbólica que representa la excitabilidad de la hormiga i . La función S , así definida, tiene su dominio entre 1 y 0, de tal manera que mientras S permanezca positiva, la hormiga en cuestión se considerará activa. Las hormigas activas pueden moverse aleatoriamente por la red, avanzando una celda en cada paso de tiempo. La función antes descrita, decrece con el tiempo, de tal manera que todas las hormigas finalmente se inactivan. Las que se encuentren inactivas y no sean activadas por el contacto con otra hormiga, pueden activarse al azar con valor prefijado de probabilidad.

El modelo presentado anteriormente, y que ha resultado de gran ayuda en la descripción cualitativa y cuantitativa de las dinámicas espaciales y temporales en la conducta social de las hormigas, se conoce como autómatas celulares móviles o como red neuronal fluida, y fue introducido por primera vez por Octavio Miramontes y sus colegas, Ricard Solé, en la Universidad Politécnica de Catalunya, España, y Brian Goodwin, entonces en la Universidad Abierta de la Gran Bretaña.

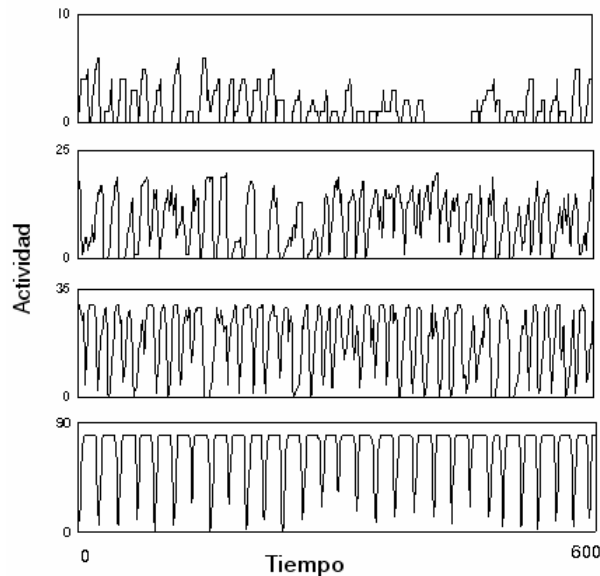


Figura 7: Oscilaciones espontáneas en un modelo de hormigas virtuales; de arriba hacia abajo corresponden a densidades de 0.06, 0.2, 0.3 y 0.9. En este ejemplo, la red contenía un total de $10 \times 10 = 100$ celdas, por lo que la población absoluta fue de 6, 20, 30 y 90 individuos en cada caso. La densidad se incrementa de arriba hacia abajo y se observa cómo en la primera gráfica (densidad = 0.06) la dinámica es francamente irregular y sin un patrón definido, mientras que en la última (densidad = 0.9) existe un patrón periódico y ordenado.

Oscilaciones espontáneas

Experimentos con hormigueros reales han revelado que la conducta de individuos aislados es muy diferente de la conducta cuando estos se encuentran en interacción con sus compañeros de la colonia. Los individuos aislados se activan y mueven de manera desordenada, mientras que los individuos en las colonias lo hacen de manera sincronizada y periódica. Surge de inmediato la pregunta: ¿en qué momento se pasa de un estado al otro y cuál es el mecanismo que lo genera? Para responder, se diseña un modelo de autómatas celulares móviles en el que se puede variar la densidad del hormiguero virtual y con ello observar cómo las oscilaciones emergen cuando la densidad alcanza ciertos niveles. Densidades altas implican tasas de

contactos mayores entre las hormigas y por ello la coherencia y el comportamiento colectivo se manifiestan claramente. En el conjunto de gráficas que se muestran en la figura 7 se tienen cuatro casos y muestran que la densidad es el único parámetro responsable de la transición de fase orden-desorden.

Hormigas al borde del caos

El modelo descrito anteriormente revela propiedades insospechadas presentes en la sutil dinámica social de las hormigas reales. En la gráfica derecha de la figura 8 se muestra el número de activaciones espontáneas *per capita* que ocurren en el hormiguero. Cada punto representa una serie de tiempo y se han considerado 20 réplicas para cada valor de densidad. La línea continua representa el mejor ajuste a los datos. Se observa claramente la tendencia del sistema hacia estados de mayor coherencia (menos actividades espontáneas) en función del aumento de la densidad (la escala es porcentual).

El valor exacto de densidad para el cual ocurre la transición orden-desorden y que marca la frontera entre el caos y el orden (el borde del caos), puede ser identificada con precisión mediante el uso de medidas informáticas. La entropía de Shannon-Kolmogorov así como la complejidad algorítmica son dos ejemplos. Aquí nos limitaremos al análisis de la última no sin antes mencionar que ambas cantidades se comportan, en el modelo, de manera muy similar. La complejidad algorítmica (introducida por el célebre matemático ruso Andrey Nikolaevich Kolmogorov (1903-1987)), mide la complejidad de una serie de datos en términos del número mínimo de bits de un programa de cómputo que pueda reproducir la cadena de datos originales. En la práctica esto es muy difícil de lograr, así que se han ideado maneras más simples de medir tal tamaño mínimo del programa, reduciendo el problema a la estimación del número de operaciones de “cortar” y “pegar” los unos y ceros de una serie binaria a la cual se ha reducido la serie de tiempo original. Este sencillo método nos da una buena medida de la complejidad. Se espera que tal complejidad sea mayor para dinámicas totalmente desordenadas y menor para dinámicas con un cierto grado de orden. Lo que puede observarse en la segunda gráfica (lado izquierdo de la figura 8), es que la complejidad algorítmica en el modelo alcanza un pico máximo en una densidad cercana a 0.2. y este valor máximo marca el sitio de la transición o de la frontera entre el orden y el caos.

Nigel Franks y sus colegas en Inglaterra, sabían con anterioridad que las hormigas *Leptothorax* se autoorganizan para construir nidos con tamaños que caen dentro de un patrón. Los experimentos que estos autores llevaron a cabo consistían en situar a una colonia de hormigas entre dos vidrios de microscopio, con cuatro pequeñas separaciones de cartón entre ambos, de tal manera que estas dos placas de vidrio sirvieran como piso y techo del futuro nido. A las hormigas se les presentó una pequeña cantidad de materiales de construcción en forma de pequeñas esferas sólidas. Este material podía estar situado, de manera desordenada, dentro o fuera del sandwich de vidrio. Lo que ocurrió fue verdaderamente sorprendente: las hormigas tomaron el material y formaron un círculo con él, de tal manera que ahora

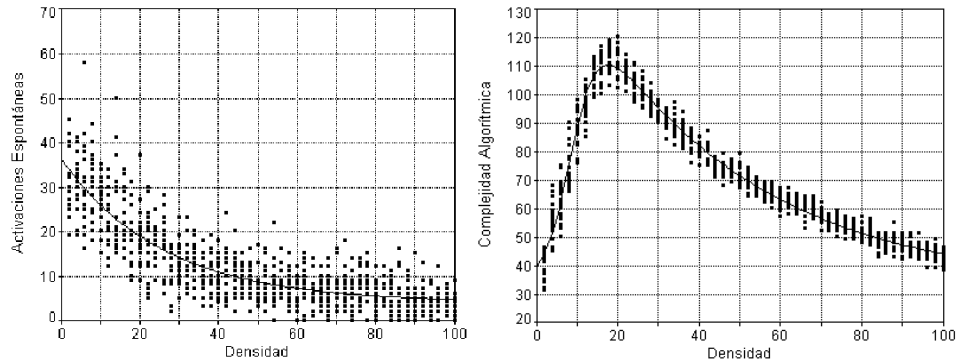


Figura 8

tenían un nido completo con piso, techo y una pared circular (como se muestra en la fotografía de la fig. 9); la colonia quedaba siempre situada en el centro. Una vez que los nidos eran construidos, los experimentadores deformaban el círculo de material de tal manera que el área interior disminuyese o aumentase. En ambos casos, las hormigas siempre reconstruían su nido hasta dejarlo con el área inicial.

La gráfica que se muestra en la parte derecha de la fig. 9 es la relación entre el número de individuos de una colonia y el área del nido construido. Se consideraron once colonias diferentes y se observó que la pendiente del ajuste lineal, que no es otra cosa que la densidad, tenía un valor de: 0.19 ± 0.03 ! Este valor se encuentra muy cerca de aquel para el cual el modelo predice que la colonia estaría situada al borde del caos y por ello se puede afirmar que, de hecho, una colonia real se sitúa de manera autoorganizada en la frontera entre el orden y el desorden.

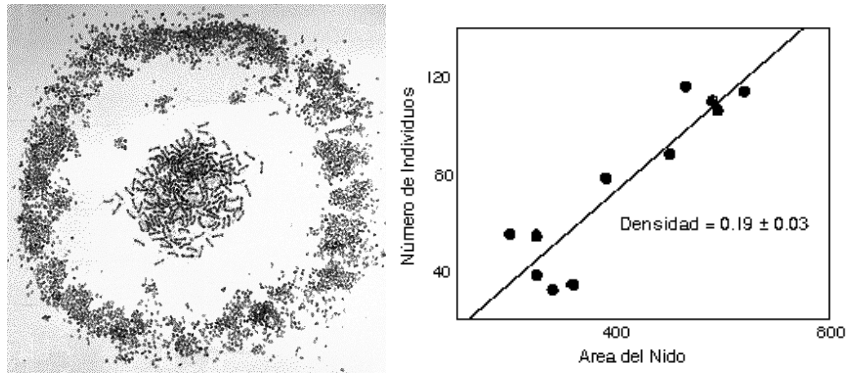


Figura 9

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Anderson, Philip W. (1994), "Physics: The Opening to Complexity". Preface to the NAS Proceedings of the Colloquium on Physics: The Opening of Complexity, June 27-28, Irvine, CA.
- [2] Schrödinger, E. (1943), *What is Life?*, Cambridge.
- [3] Murphy, M. P. & O'Neill, L. A. J. (eds.) (1995), *What is Life? The Next Fifty Years: Speculations on the Future of Biology*, Cambridge University Press.
- [4] Green, S. (1981), "Interstellar chemistry: Exotic molecules in space", *Annual Rev. Phys. Chem.* 32: 103-138.
- [5] Bernstein, M. P., Dworkin, J. P., Sandford, S. A., Cooper, G. W. & Allamandola, L. J. (2002), "Racemic amino acids from the ultraviolet photolysis of interstellar ice analogues", *Nature*, vol. 416, 28 March: 401-403.
- [6] Chambers, J. E. (2001), "Making more terrestrial planets", *Icarus* 152: 205-224 .
- [7] Chyba, Christopher *et al.* (2002), "Europa as an abode of life", *Origins of life and evolution of the biosphere* 32: 47-67.
- [8] Bonabeau, E. *et al.* (1997), "Self-organization and alternative models in insect societies", *Trends Ecol. Evol.* 12: 188.
- [9] Bonabeau, E. y Théraulaz, G. (2000), "Swarm smarts", *Scientific American*, March: 72-79.
- [10] Bak, P. & Paczuski, M. (1995), "Complexity, contingency and criticality", *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 92: 6689-96.
- [11] Cole, B. J. (1991), "Short-term activity cycles in ants: generation of periodicity by worker interaction", *American Naturalist*, 137: 244-259.
- [12] Cole, B. J. (1991), "Is animal behaviour chaotic?: evidence from the activity of ants", *Proc. R. Soc. London B* 244: 253-259.
- [13] Cole, B. *et al.* (1996), "Mobile Cellular Automata models of ant behavior - Movement activity of *Leptothorax allardycei*", *American Naturalist* 148: 1-15.
- [14] Franks, N. R. *et al.* (1990), "Synchronization of the behaviour within nests of the ant *Leptothorax acervorum* (Fabricius): I. Discovering the phenomenon and its relation to the level of starvation", *Bull. Math. Biol.* 52: 597-612.
- [15] Franks, N. R., Wilby, A., Silverman, B. W. y Tofts, C. (1992), "Self-organizing nest construction in ants: sophisticated building by blind bulldozing", *Anim. Behav.* 44: 357-375.
- [16] Miramontes, O., Solé, R. & Goodwin, B. C (1993), "Collective behaviour of random activated mobile cellular automata", *Physica D* 63: 145-160.
- [17] Miramontes, O., Solé, R. and Goodwin, B. C. (1993), "Antichaos in Ants: The Excitability Metaphor at Two Hierarchical Levels". In: *Proceedings of the Second European Conference on Artificial Life*, Brussels, Belgium.
- [18] Miramontes, O. (1995), "Order-disorder transitions in the behavior of ant societies", *Complexity* 1(3): 56-60.
- [19] Solé, R., Miramontes, O. and Goodwin, B. C. (1993), "Collective oscillations and chaos in the dynamics of ant societies", *J. Theor Biol.* 161: 343-357.
- [20] Solé, R. y Miramontes, O. (1995), "Information at the edge of chaos in fluid neural networks", *Physica D* 80: 171-180.
- [21] Solé, R. V. *et al.* (1996), "Complejidad en la frontera del caos", *Investigacion y Ciencia* (edición española del *Scientific American*) 236: 14-21.

- [22] Solé, R. V., Miramontes, O. and Goodwin, B. C. (1993), "Emergent Behaviour in Insect Societies: Global Oscillations, Chaos and Computation". En: Haken, H. and A. Mikhailov (eds.), *Interdisciplinary Approaches to Nonlinear Complex Systems*, Springer-Verlag, Berlin.

LECTURAS RECOMENDADAS

A continuación se sugieren varios documentos, agrupados temáticamente, algunos de los cuales pueden consultarse en: <http://miro.fisica.unam.mx/curso/curso.html>

Definiciones modernas del concepto *vida*

- Korzeniewski, B. (2001), "Cybernetic Formulation of the Definition of Life", *Journal of Theoretical Biology* 209 (3) April: 275–86.
- Langton, Christopher (1987), *A New Definition of Artificial Life*, Santa Fe Institute.

Máquinas moleculares y el origen de la vida

- Martínez-Mekler, G., Aldana, M., Cazarez-Bush, F., *et al.* (1999), "Primitive molecular machine scenario for the origin of the three base codon composition", *Origins Life Evol B* 29 (2): 203-214 Mar.
- Aldana, M., Cazarez-Bush, F., Cocho, G., *et al.* (1998). "Primordial synthesis machines and the origin of the genetic code", *Physica A* 257 (1-4): 119-127 Aug 15. Disponible en: <http://jfi.uchicago.edu/~maximino/YO/PAPERS/origin2.pdf>

Autoorganización y sociedades de insectos

- Bonabeau, E. y Théraulaz, G. (2000), "Swarm smarts", *Scientific American*, March: 72-79.
- Miramontes, O., Solé, R. V. and Goodwin, B. C. (2001), "Neural Networks as Sources of Chaotic Motor Activity in Ants and How Complexity Develops at the Social Scale", *International Journal Of Bifurcation And Chaos*, vol. 11, no.6, June: 1655–1664. Disponible en: http://scifunam.fisica.unam.mx/mir/2001_ijbc.pdf
- Miramontes, O. (2000), "Orden y caos en la organización social de las hormigas", *Ciencias* 59:32–45. Disponible en: http://scifunam.fisica.unam.mx/mir/2000_ciencias.pdf

Física y biología: un matrimonio feliz

- Blomberg, Clas (1994), "The Physicist's Road to Theoretical Biology and the Mind-Matter Problem", *Journal of Theoretical Biology* vol. 171: 41–52.
- Hopfield, J. J. (1994), "Physics, Computation, and Why Biology Looks so Different", *Journal of Theoretical Biology* vol. 171: 53–60.

ALGUNOS ASPECTOS DE LA TERMODINÁMICA DE LA VIDA *

AL ser invitado a participar en este symposium en honor del profesor Oparin,¹ de cuyos importantes trabajos y su repercusión filosófica hablaba ayer el doctor Alfredo Barrera, me preguntaba cuáles podrían ser las facetas del problema del origen de la vida que pudiera tratar un físico ante un auditorio heterogéneo de físicos, matemáticos y sobre todo de biólogos. Y ante esa pregunta, decidí discutir algunos aspectos de la termodinámica de la vida y de los fenómenos de transición.

A primera vista, parecería que los organismos vivos contradicen las leyes de la termodinámica. De acuerdo con la segunda ley de esta disciplina, se dice que un sistema aislado se va desordenando, se vuelve más homogéneo en su estructura espacial, hasta llegar a un estado en que no cambia con el paso del tiempo; por el contrario, se sabe que la materia viva muestra y mantiene un orden espacial y funcional en tanto existe como tal. Si nos observamos, podremos ver que tenemos la cabeza en un sitio, los pies en otro y las manos en otro más, es decir, percibimos en nosotros mismos una estructura espacial; si examinamos el interior de la célula, vemos no sólo que dentro de ella existe un orden espacial (núcleo, mitocondrias, ribosomas, etcétera) sino también un orden funcional; nos encontramos, en tal caso, ante un conjunto de reacciones químicas que no se llevan a cabo simultáneamente y de un modo desordenado, sino secuencialmente, siguiendo un orden funcional, un orden temporal.

Vemos que, a medida que pasa el tiempo, evoluciona la vida en la Tierra y crece el número de seres vivos en ésta; en otras palabras, nos encontramos frente a un creciente número de zonas, de regiones ordenadas de materia, la materia viva. Este hecho no sólo es válido para la materia viva misma sino, en el caso de los seres humanos, para sus productos sociales. Si consideramos, por ejemplo, el auditorio dentro del cual nos encontramos en este momento, estaremos de acuerdo en que es una estructura muy ordenada; también podemos estar conscientes de que si la vida desapareciese de esta zona de la Ciudad de México, no tardarían muchos años para que este edificio empezase a desordenarse, a colapsarse y destruirse por falta de atención y mantenimiento.

* Publicado en: Lazcano-Araujo, A. y Barrera, A. (eds.), 1978. *El origen de la vida: symposium conmemorativo en homenaje a A. I. Oparin*. México: UNAM. Dicho symposium se llevó a cabo en la Facultad de Ciencias, UNAM, del 23 al 25 de abril de 1975.

¹ Alexander Ivánovich Oparin (1894-1980) fue un biólogo y bioquímico soviético pionero en el estudio científico del origen de la vida en el planeta Tierra. Oparin visitó la Facultad de Ciencias de la UNAM en varias ocasiones.

¿Cuál es la respuesta a esta aparente paradoja entre la segunda ley de la termodinámica y el orden espacial y funcional de la materia viva? La respuesta, como ayer comentaba el profesor Oparin, es que ni en los tiempos primitivos de la superficie terrestre, ni en el momento actual, nos encontramos ante una situación en la que valgan los comentarios anteriores sobre la segunda ley de la termodinámica; para que fuesen válidos, se necesitaría de un sistema cerrado en que no saliese ni entrase energía y materia, que estuviera aislado del resto del Universo. No es este el caso precisamente, ya que desde el origen de la Tierra hasta la época actual su superficie es un sistema abierto al que está entrando la energía del Sol.

La siguiente pregunta que nos podemos hacer es si dado un sistema abierto, confinado en el espacio, en el que pueden tener lugar reacciones químicas y un flujo de materia (entrada y salida de diversos compuestos químicos) y energía, se pueden producir en él estructuras ordenadas en el espacio y reacciones químicas oscilantes con algunas de las características que muestra la materia viva. La respuesta a esta pregunta es afirmativa; pueden llevarse a cabo experimentos en que aparecen algunos de estos rasgos. Por ejemplo, si en una cápsula de Petri ponemos agua y aserrín y calentamos esta mezcla homogénea vemos que, al aumentar el flujo de calor, llega un momento en que se forman las llamadas celdas de convección o sea que el aserrín empieza a moverse, no de modo desordenado sino formando estructuras geométricas que, vistas desde arriba, recuerdan un panal.

Es decir, que el flujo de energía (calor) en la cápsula de Petri permite un movimiento ordenado del agua, movimiento que desaparece cuando quitamos la fuente de energía. Esto tiene su contrapartida en la materia viva ya que todos sabemos que si, cortando la fuente de energía que son los alimentos, dejamos de comer durante un tiempo suficientemente largo, la estructura ordenada que somos desaparece.

Por otro lado, y guardando cierta relación con los experimentos del profesor Herrera y que se discutieron en una de las conferencias anteriores, hay reacciones químicas que muestran un orden no sólo espacial sino temporal. Una de ellas es la llamada reacción de Belusov-Zhabotinsky. Cuando en un tubo de ensayo se pone un conjunto de ciertos reactivos químicos, el contenido del tubo pasa de azul a rosa y viceversa una y otra vez o se forman bandas que aparecen y desaparecen de modo cíclico. Si se usa una cápsula de Petri, se forman espirales de color diferente al resto del medio y que van dando vueltas. Estos fenómenos se presentan mientras dura la fuente de energía química que proporciona una de las reacciones del complejo. Es este un experimento muy interesante y que da la impresión de que el fluido está vivo o de que se trata del truco de un mago. Vemos, pues, que en fenómenos químicos de este tipo, en que tenemos un sistema confinado, abierto, nos encontramos, en presencia de un flujo de energía, frente a características que recuerdan los rasgos no sólo estáticos, sino dinámicos de la materia viva.

Claro que esto no quiere decir que tales estructuras estén vivas, sino que estas características de la materia viva pueden ser comprendidas mediante las leyes de la química sin necesidad de invocar leyes vitalistas especiales.

Otro aspecto interesante en este tipo de fenómenos es la presencia de cambios de estado; en el caso del experimento con agua y aserrín observábamos el cambio

de un sistema muy desordenado a un sistema ordenado. Son fenómenos que tienen una similitud muy cercana con los cambios de fase de un líquido como el agua.

Todos sabemos que si calentamos un trozo de hielo éste empieza a fundirse y se transforma en agua líquida; que si lo seguimos calentando se transforma en vapor; que si enfriamos ese vapor éste empieza a condensarse en agua líquida, etcétera. Muchos de los aspectos de la evolución de la materia no viva y que una vez siendo viva cambie a formas cada vez más complejas, recuerda estos cambios de fase.

¿Qué características tienen esos cambios de fase? Quisiera señalar una: si nosotros, por poner un ejemplo, calentáramos un imán, al llegar a cierta temperatura desaparecería su imantación; el imán no se funde, no es necesario que se funda el hierro para que sus cualidades magnéticas desaparezcan, sino que el modo ordenado en que están los átomos en el metal, y que implica las cualidades de atracción del imán, desaparece, aunque esto no sucede bruscamente. Antes de llegar a la temperatura en que este ordenamiento desaparece, islotes del metal se desordenan y vuelven a ordenarse; estos islotes se vuelven cada vez mayores, hasta que uno de ellos desordena completamente el metal. Lo mismo vale en la otra dirección: si se tiene un hierro caliente y en presencia de un campo magnético débil bajamos la temperatura, empiezan a aparecer y desaparecer islotes de material imantado hasta que uno de ellos ordena el metal. O sea que en estos fenómenos de transición son muy importantes (y son una de sus características fundamentales) las llamadas fluctuaciones y los mecanismos de ampliación de tales fluctuaciones. Normalmente, lejos de las condiciones en que tienen lugar estos cambios de fase, siempre hay fluctuaciones, islotes que aparecen y desaparecen y al acercarnos a las condiciones en que tiene lugar el cambio, estas fluctuaciones se hacen mayores hasta que una de ellas, en vez de desaparecer, reordena el material; al tener lugar este cambio no sólo las relaciones entre átomos cercanos (las correlaciones de corto alcance) sino las relaciones entre átomos lejanos, son importantes (correlaciones de largo alcance) para que todo el material cambie de estado.

Vemos pues que la evolución de la materia de su fase prebiótica a biótica y la de la materia viva a lo largo de sus fases bióticas, muestran una gran similitud, en algunos de sus aspectos, con lo que en física se denomina *cambios de fase por ampliación de fluctuaciones*. La comprensión de estos fenómenos puede ayudar a la de la problemática del origen y evolución de la materia viva, y de hecho existen algunas teorías a lo largo de esta línea de pensamiento. Como hemos dicho, en las condiciones en que tiene lugar el cambio de fase no sólo las correlaciones de corto alcance, sino las de largo alcance (y de hecho las correlaciones de todas las magnitudes) son importantes, de modo que podríamos decir que se establece una fuerte interacción entre el todo y las partes.

La relevancia de esta interacción entre el todo y las partes suele descuidarse con frecuencia y de hecho gran parte de este descuido está implícito en el punto de vista reduccionista en que se trata de reducir la biología a química, la química a física atómica y molecular y eventualmente ésta a la física nuclear. En ese sentido, sólo las ciencias del micromundo serían verdaderamente fundamentales, ya que entendidas éstas el conocimiento de los niveles superiores de organización

sería un mero ejercicio, complicado si se quiere, pero al fin un ejercicio y por lo tanto la biología o la sociología serían “menos científicas” que la química o la física. ¿Qué podemos decir de este enfoque reduccionista? Sin olvidar su importancia en muchos casos, podemos ver que hasta ahora el conocimiento de la ecuación de Schrödinger, la ecuación de la mecánica cuántica que gobierna los fenómenos atómicos, no ha permitido el reducir la química a física ni mucho menos la biología a la sociología. Términos en las ecuaciones que son muy pequeños en un nivel dado, y que por lo tanto no son sugeridos o comprobados por los experimentos en ese nivel, pueden ser importantes en niveles superiores de organización, mientras que la organización de niveles superiores puede operar como condiciones a la frontera de las ecuaciones que rigen la dinámica de niveles inferiores de organización. Esta interacción entre niveles de organización, entre el todo y las partes, recibe poco énfasis en el punto de vista reduccionista y quizá a esto podemos achacar el relativo descuido en relación con los fenómenos de regulación biológica, de las interacciones dentro de la célula y de los aspectos de diversidad y complejidad de la vida.

En este momento cabe preguntarnos, ¿qué puede hacer un físico o un matemático en estos problemas de cambio de estado, de amplificación de fluctuaciones, de interacción entre diversos niveles de organización, etcétera?

La respuesta a la pregunta anterior es que hay al respecto un campo abierto a la investigación; si consideramos la reacción química que se discutía al principio, la reacción de Zhabotinsky, veremos que puede explicarla un conjunto de ecuaciones no lineales acopladas; la matemática no lineal es de importancia fundamental para comprender este tipo de fenómenos y vale la pena señalar que la matemática no lineal es un campo difícil en que está casi todo por hacer.

También debemos señalar que el análisis de las interacciones en sistemas de muchos cuerpos, de muchos entes, es un campo muy difícil. En la física los avances que se han logrado al respecto, en los últimos siglos, siempre han sido a base de aproximaciones al comportamiento de un sistema de uno o dos cuerpos frente a leyes dinámicas sencillas. En el caso de la astronomía, cuando se tienen tres cuerpos y no se hacen aproximaciones no se puede resolver el problema; vemos, pues, que el ataque de este tipo de problemas, en los que se considera un número muy grande de entes en interacción compleja, no sólo es fundamental a nivel de la química, la biología o la sociología, sino que ayudaría a resolver muchas de las dificultades básicas en la física atómica, nuclear y subnuclear.

Al citar la sociología, queremos señalar que los fenómenos de amplificación de fluctuaciones y cambios de fase pueden ser importantes no sólo en las ciencias naturales, sino en el análisis de sistemas sociales. Por poner un ejemplo, Kuhn, en su libro *La estructura de las revoluciones científicas*, discute cómo antes de que se forme una ciencia se tienen diversas hipótesis, las cuales coexisten durante un tiempo, paralelamente, con igual peso, hasta que una de ellas empieza a tener un peso mayor y se forma lo que él llama *ciencia normal*, es decir, el conjunto de reglas y métodos de trabajo que definen lo que durante un tiempo será *esa ciencia* y qué problemas considera como válidos y cuáles no. A medida que pasa el tiempo y se

empiezan a encontrar contradicciones que no parecen ser solubles dentro de ese marco o que lo son sólo a expensas de elaboraciones muy complejas y artificiales, empieza a actuar otra vez el fenómeno de las fluctuaciones; comienzan a aparecer, otra vez, hipótesis paralelas, cada una con peso parecido hasta que una de ellas adquiere mayor peso, empieza a ser capaz de sistematizar la realidad de modo mejor y se cambia a otra zona científica. En el lenguaje de Kuhn, se pasa de este periodo de transición de *ciencia revolucionaria* a lo que él llama *ciencia normal*.

Esto sugiere que el estudio de tales saltos cualitativos, tales transiciones y la amplificación de fluctuaciones en sistemas complejos, puede ser una herramienta importante en la comprensión de los fenómenos de evolución y revolución social, así como del papel activo y consciente del hombre como promotor de esos cambios; en ese sentido, los fenómenos de transición que se esbozaban tanto a nivel físico como en el análisis de la evolución de la estructura de la ciencia, podrían estar presentes a todos los niveles.

Ayer oíamos cómo el doctor Barrera señalaba la importancia de los estudios sobre la transición de la materia de lo no vivo a lo vivo, en los cuales el profesor Oparin tuvo y tiene un papel fundamental y cómo ayudaron a desterrar la religión del reino de la ciencia. Creemos que vale la pena añadir que la comprensión de las leyes de la evolución de la materia, a diversos niveles de los fenómenos de transición y amplificación de fluctuaciones, nos pueden ayudar a comprender la dinámica de los cambios sociales revolucionarios hacia una sociedad más justa, así como el papel del hombre como motor de estos cambios. Sin embargo, como señalaba ayer el maestro Cifuentes respecto a la obra del profesor Oparin, en el estudio de los cambios sociales, la teoría y la práctica no bastan por separado sino que deben ir unidas. En ello, hay que ser conscientes de que a lo largo de ese camino se reciben disgustos y sinsabores en vez de premios; pero debe de servir de estímulo el saber que es la senda que puede llevar a la eliminación de la explotación del hombre por el hombre.

Ayer el profesor Oparin agradecía, en su introducción, a la Facultad de Ciencias, que él nombraba como una facultad progresista, el haber sido invitado por ella a concurrir a este simpósium. Creo que nosotros debemos agradecerle a él una vez más el hacer presentes sus ideas sobre el origen de la vida y de la transición de materia no viva a viva las cuales, como decíamos antes, aparte de la importancia filosófica que tienen al desechar el idealismo y enfatizar la filosofía materialista, nos pueden ayudar a comprender mejor la dinámica de la sociedad en que vivimos y darnos mejor idea de cómo cambiarla. Es esta Facultad de Ciencias la que se siente honrada con la visita del profesor Oparin y con la presentación de su obra.

BIBLIOGRAFÍA

- Belusov, B. P., 1959. *Sborn referat. radiat. Meditsin za 1958*: (Colección de resúmenes sobre la medicina de la radiación). Medgiz, Moscow. p. 145.
- Kuhn, T. S., 1971. *La estructura de las revoluciones científicas*. Breviario 213 del Fondo de Cultura Económica.
- Prigogine, I., Nicolis, G. y Babloyantz, A., 1972. *Phys. Today* Nov. p. 23.
- Zaikin, A. N. y Zhabotinsky, A. M., 1970. *Nature* 225: 535–537.
- Zhabotinsky, A. M., 1968. *Biofizika* 2, 306, 1964, Acad. Sci. USSR. (Nauka) 1967. *Russ. V. Phys. Chem.* 42, 1649.

ERNST MAYR, LA TEORÍA SINTÉTICA DE LA EVOLUCIÓN Y UNA NUEVA VISIÓN DEL AZAR Y LA NECESIDAD *

CONSTRUIR puentes, definir convergencias, complementar o encontrar la síntesis del conocimiento han sido procesos fundamentales en la historia de la ciencia. En la física, por ejemplo, con la ley de la gravitación universal, la mecánica newtoniana da una sola visión de los fenómenos celestes y de los que tienen lugar en la Tierra; Maxwell descubre o inventa la forma de sintetizar electricidad y magnetismo en un solo cuerpo teórico formal y el trabajo de Einstein sobre el efecto fotoeléctrico unifica concepciones aparentemente irreconciliables acerca de la naturaleza de la luz.

Cuando las síntesis tienen lugar dentro del mismo paradigma (en el sentido de Kuhn), se ha contribuido a la maduración de una forma de pensar vigente; si ocurre la convergencia de paradigmas diferentes o se da una lucha de donde resulta la destrucción de uno de ellos, se dice legítimamente que se ha dado una revolución científica.

Los procesos de convergencia requieren del desarrollo de lo que el sociólogo portugués Sousa Santos ha llamado, en el ámbito de las ciencias sociales, *hermenéutica diatópica*: un arte de interpretación para ir de un lugar a otro y comprender significados lejanos, contrapuestos o ajenos; un puente para mostrar explícitamente simpatías y diferencias y con la capacidad de, como en los casos que refiere este ensayo, dar como resultado no sólo el tránsito de las ideas entre los dos lugares sino su identificación como una sola.

En este trabajo se discuten dos ejercicios de hermenéutica diatópica: la que culminó al término de la primera mitad del siglo XX en la teoría sintética de la evolución y la de hoy, en proceso de gestación todavía, entre la biología del desarrollo y la de la evolución.

En la primera fue necesario tender los puentes entre evolucionistas atentos a dos tipos de causas, las próximas y las remotas; entre dos tradiciones de investigación, la de la genética mendeliana y la de los naturalistas; entre biólogos de laboratorio y biólogos de campo.

La segunda, bautizada como la síntesis del programa *evo-devo* al tomar las primeras sílabas de los nombres ingleses de evolución y desarrollo, surge de la tensión entre la mutabilidad biológica, azarosa y sorpresiva, y el desarrollo embriológico,

* Publicado en: Sánchez, F., Miramontes, P. y Gutiérrez, J. L. (coords.), 2002. *Clásicos de la biología matemática*. México: CEIICH-UNAM / Siglo XXI.

determinista y fiable; atiende al conflicto no resuelto entre función y estructura en la historia de la vida, surgido cuando se confrontan los mecanismos de adaptación evolutiva con las restricciones de carácter mecánico, energético y fisicoquímico.

LA CONFERENCIA DE PRINCETON Y LA TEORÍA SINTÉTICA DE LA EVOLUCIÓN

En el extenso ensayo inicial, prólogo a *The Evolutionary Synthesis*, Ernst Mayr¹ (ver figura 1) sostiene que la expresión “síntesis evolucionista” como teoría en donde convergen la genética y la visión darwiniana de la historia de la vida –capaz de explicar convincentemente el origen de las especies tanto en la evolución gradual a pequeña escala como en la macroevolución– había sido presentada por Julian Huxley en *Evolution: The Modern Synthesis* (1942), en donde el biólogo británico había escrito:

El momento está maduro para avanzar rápidamente en nuestro entendimiento de la evolución. La genética, la fisiología del desarrollo, la ecología, la sistemática, la paleontología, la citología y el análisis matemático nos han proporcionado tanto nuevos hechos como nuevas herramientas de investigación. Lo que hoy necesitamos es un ataque concertado y una síntesis. Si este libro contribuye a ese punto de vista sintético, me dará mucho gusto. (Mayr y Provine, 1980: 29)

Empero, la unificación había empezado años antes y estaba esencialmente terminada en enero de 1947 cuando, bajo los auspicios del Consejo Nacional de la Investigación (NRC, por su sigla en inglés) de Estados Unidos y la organización entre otros del propio Mayr, se reunieron destacados especialistas de los más diversos campos –sistemistas, paleontólogos, morfólogos, ecólogos y genetistas de varias escuelas– en Princeton, Nueva Jersey, para examinar los rápidos cambios experimentados en genética evolutiva entre 1936 y 1947, lapso aproximado en el cual se había producido la síntesis, tratar de reconstruir la serie de acontecimientos que le habían dado lugar e identificar los factores responsables de los desacuerdos precedentes.

Todavía en la década de los veinte y la primera mitad de la de los treinta había grandes diferencias entre los evolucionistas darwinianos y los genetistas. Los primeros eran zoólogos, paleontólogos o botánicos con largas carreras de práctica en el campo y defendían las tesis de la evolución gradual y de la selección natural como su fuerza directriz.

¹ Ernst Mayr, biólogo estadounidense, nació en Alemania en 1904. Es conocido, sobre todo, por sus investigaciones en taxonomía de las aves, genética de poblaciones y evolución. Graduado en la Universidad de Berlín en 1926, ha trabajado de manera ininterrumpida en Estados Unidos desde 1932. Con base en un trabajo de campo extraordinario (sobre todo para estudiar las aves del Pacífico suroccidental), antes aun de 1940, Mayr hizo contribuciones esenciales a la teoría de la evolución por selección natural. En particular, propuso una nueva definición del concepto de especie (hasta entonces impreciso y vago) y explicaciones como el llamado “principio del fundador” para el proceso de especiación. La lectura de su obra se considera imprescindible en sistemática, biología evolutiva y filosofía de la biología. Entre sus trabajos más conocidos destacan *Methods and Principles of Systematic Zoology* (con E. G. Linsley y R. L. Usinger), *Animal Species and Evolution* (1963) y *The Growth of Biological Thought* (1982).



Figura 1: Ernst Mayr (1904–2005).

A su vez, los mendelianos eran genetistas de laboratorio, y para ellos la presión mutacional génica, al actuar en pequeñas poblaciones, es la responsable de la evolución no sólo sin la ayuda de la selección natural sino en oposición a ella y, como la variación genética es discontinua, la evolución tiene que ocurrir a saltos.

Las publicaciones especializadas de las dos primeras décadas del siglo exhiben grandes diferencias en la terminología al uso en las diversas ramas de la biología. En particular, los naturalistas ignoraban los avances de la genética posteriores a 1910 y en sus alegatos había una confusión, por ejemplo, entre el concepto de “mutación” de Hugo de Vries² y el de Thomas H. Morgan.³ Los genetistas, a su vez, desconocían la literatura sobre variación geográfica y especiación en poblaciones naturales y:

no había nada en los escritos supuestamente evolucionistas de T. H. Morgan, R. A. Fisher y J. B. S. Haldane para explicar la multiplicación de las especies ni de taxones superiores ni el surgimiento de las novedades evolutivas. Sus interpretaciones sólo se referían al nivel de gen en un solo acervo génico. (Mayr y Provine, 1980: 9)

de manera que la brecha en la comunicación entre ambos grupos era enorme.

² Hugo Marie de Vries (1848–1935), botánico y genetista holandés. Introdujo el estudio experimental de la evolución orgánica; redescubrió en 1900 los principios mendelianos de la herencia y reconoció la primacía de Gregorio Mendel, quien los había publicado en 1866. Para él, una “mutación” es la aparición aleatoria de nuevas formas o variedades en una población biológica formada por especímenes comunes; con base en la observación de este tipo de fenómenos, en donde se tenía la posibilidad de estudiar la evolución experimentalmente, de Vries postuló la evolución como una serie de cambios radicales abruptos suficientes para producir la existencia de nuevas especies en un solo salto.

³ Thomas Hunt Morgan (1866–1945), zoólogo y genetista estadounidense, recibió el Premio Nobel de Fisiología y Medicina en 1933 por su trabajo experimental con la mosca de la fruta (*Drosophila melanogaster*) mediante el cual estableció la teoría cromosomática de la herencia. Para él, una “mutación” es una alteración génica que afecta los rasgos heredados por los descendientes.

Asimismo, según Mayr, la discordia provenía de las formas de pensar esencialmente distintas de los actores del diferendo; sus preocupaciones estaban motivadas por “biologías diferentes”: una, atenta a las causas próximas, la otra, a las causas últimas. Esta diversidad de intereses es sustancial para comprender los escollos que hubieron de librarse en la elaboración de la síntesis.

Las causas próximas ocupan la atención de los biólogos funcionalistas, interesados en el fenotipo y su desarrollo como resultado de la ejecución del programa genético sujeto a las restricciones del medio ambiente y a las particularidades de los individuos.

En la contraparte, los biólogos evolucionistas abstraen la búsqueda de las causas últimas del dominio de lo sobrenatural y lo someten al de la razón: investigan los orígenes del genotipo, indagan la historia de las adaptaciones, responsables de los programas genéticos actuales, y por ello les importa lo que haya ocurrido hace mucho, desde el principio de los tiempos.

En el primer tercio del siglo XX esta diversidad de intereses provocaba verdaderos diálogos de sordos. Por ejemplo, prevalecía la idea –presente aún en disputas como la de hoy entre evolucionistas y embriólogos– de que los métodos del biólogo experimental son más objetivos y científicos y por lo tanto superiores al enfoque especulativo del naturalista. Por esto, zoólogos como Koelliker insistían en que muchos de los taxones de la sistemática pueden ser polifiléticos pues consisten de especies o géneros similares no porque desciendan de un ancestro común sino porque han sido producidos por las mismas leyes fisicoquímicas.

Además, en cada campo se trataban niveles diferentes de la jerarquía evolutiva: desde la perspectiva de los genetistas, bastaba entender lo que ocurre a nivel de los genes para comprender el proceso evolutivo pues la adecuación total sería la suma de las adecuaciones de los genes individuales; los naturalistas, a su vez, no veían conexión alguna entre los cambios de las frecuencias génicas y los acontecimientos evolutivos en los niveles jerárquicos de especies y taxones superiores.

También había un conflicto asociado con el número de variables y la dimensión correspondiente a los procesos considerada por cada grupo: antes de la síntesis, al tratar el comportamiento de genes individuales y sus alelos dentro de un solo acervo génico, los genetistas trabajaban en un sistema prácticamente adimensional, excepto por cambios temporales menores a lo largo de una secuencia breve de generaciones; los naturalistas, por el contrario, trabajaban en sistemas bidimensionales de variación y especiación geográficas, en los espacios multidimensionales de recursos ecológicos y en las escalas temporales del paleontólogo, de decenas de miles de generaciones y miles de millones de años.

Las grandes discrepancias entre los genetistas experimentales y los naturalistas de poblaciones eran, del mismo modo, resultado de las diferentes tradiciones de investigación de cada grupo. Para cada quien, la suya era superior a la de la contraparte que “simplemente no comprendía ni los hechos ni los asuntos importantes”.

La síntesis evolucionista fue, entonces, obra de los constructores de puentes –miembros de la escuela genético-naturalista como Chetverikov, genetistas como Ford, sistematistas como Rensch, Mayr y Simpson, zoólogos como Huxley y botáni-

cos como Anderson y Stebbins—biólogos diatópicos, con un pie en cada lado, investigadores en una de las zonas capaces de comprender lo que hacían los de la otra; arquitectos que empezaron por crear la indispensable nueva terminología (“mecanismos de aislamiento”, “especies politípicas”, “acervo génico”, “simpatria”, “alopatria”, “polimorfismo balanceado”, “deriva génica”, etc.) para la hermenéutica de la visión unificada.

Pero la síntesis fue sólo el resultado de un proceso de convergencia y no una revolución científica en el sentido de Kuhn. El paradigma de la inmutabilidad biológica lo habían minado y hecho volar en pedazos los evolucionistas del XVIII y XIX, la revolución había dado sus primeros pasos con Geoffroy Saint-Hilaire y Jean-Baptiste de Lamarck y, al sustituir las formas viejas de pensamiento con el convencimiento del cambio de las especies, Charles Darwin y Alfred Russel Wallace la habían convertido en una revolución triunfante. La síntesis fue su culminación: la robusteció y mostró su inmensa fecundidad como idea articuladora esencial del pensamiento biológico.

En su ensayo, Mayr concluye:

los acontecimientos durante la síntesis ilustran de la manera más gráfica ciertos fenómenos y procesos que han tenido lugar de modo similar, una y otra vez, en la historia de la ciencia. La resistencia a las nuevas ideas, el papel de las terminologías, las dificultades de comunicación, la fusión de piezas ajenas para dar lugar a nuevas teorías, la construcción de puentes entre niveles jerárquicos diferentes, la importancia de los generalizadores y muchos otros fenómenos son importantes no sólo para la historiografía objetiva, sino también para entender el método real de la ciencia. (Mayr y Provine, 1980: 44)

El proceso de construcción de la ciencia es, desde luego, inacabable. La síntesis evolucionista de mediados del siglo XX logró algunos acuerdos básicos pero no resolvió todos los problemas.⁴ Persisten, por ejemplo, posiciones encontradas respecto al papel que se le atribuye al determinismo y al azar en la teoría darwiniana y se precisa un puente nuevo: los procesos aleatorios son importantes en la producción de variabilidad pero uno de los factores cruciales de la evolución son las restricciones no debidas al azar asociadas a la fisiología y a la competencia entre individuos y para las cuales pueden existir varias soluciones.

De este modo, dentro de la nueva hermenéutica, si las restricciones están asociadas a la fisiología y a la interacción con otros organismos, ocurre lo que puede llamarse selección externa; si se deben a las propiedades fisicoquímicas de las macromoléculas biológicas, la podemos denominar selección interna. Así, lo aleatorio ya no pesa tanto: es más, el azar es muy poco, el estrictamente necesario.

⁴ Incluso la discrepancia esencial entre gradualismo y saltacionismo ha resurgido. Véanse, como ilustración del nivel que ha alcanzado, los múltiples ensayos de Stephen Jay Gould o consúltese a Niles Eldredge en *Reinventing Darwin, the Great Debate at the High Table of Evolutionary Theory*, Nueva York, John Wiley & Sons, 1995.

EVOLUCIÓN Y DESARROLLO, OTRO CONFLICTO, OTRO PUENTE

Los biólogos del desarrollo y los evolucionistas darwinianos tienen, asimismo, tradiciones de investigación y preocupaciones distintas. En cierto sentido, persisten allí las diferencias entre experimentalistas y biólogos de campo y se manifiestan también las que corresponden al par opuesto de las concepciones deterministas o puramente estocásticas.

Por un lado, el desarrollo embriológico es fiable pues el programa genético que transforma el huevo fecundado en ser adulto lleva a cabo un proceso complejo de múltiples cambios en cascada, pero ordenado y previsible, que ha de desembocar en estructuras orgánicas determinadas.

Por el contrario, según la visión dominante, estrictamente contingencista, la evolución resulta de la composición de dos factores esencialmente azarosos: largas cadenas de pequeños cambios fenotípicos, cada uno atribuible a sendas mutaciones génicas que ocurren de manera desordenada, y desastres o catástrofes de todas las escalas en el entorno fisicoquímico y biótico en donde, al actuar la selección natural, puede resultar casi cualquier tipo de organismo.⁵

No son extraños, por consiguiente, los problemas biológicos fundamentales en los cuales ambas concepciones parecen irreconciliables. Por ejemplo, en el nivel de la evolución biótica, no es claro de qué manera un órgano tan complicado como el ojo de un vertebrado pudo haberse formado evolutivamente por medio sólo de una serie muy larga de mutaciones génicas azarosas.

Consideremos también la evolución prebiótica: ¿cómo se pudo pasar de compuestos inorgánicos y orgánicos relativamente sencillos, primero a moléculas orgánicas complicadas como los polímeros biológicos y luego a células, en lapsos razonables respecto a la edad de la Tierra?

Nuestro mundo se formó hace 4 500 millones de años aproximadamente y se han encontrado microestructuras, posibles fósiles celulares, con una antigüedad de 3 860 millones de años; como la temperatura terrestre fue muy alta durante los primeros cientos de millones de años, el lapso necesario para que una evolución prebiótica en el tercer planeta llegase a producir células habría sido extremadamente breve.

Esto ha llevado a algunos estudiosos del origen de la vida a considerar la hipótesis de una evolución prebiótica en el espacio exterior, en el medio interplanetario, en cometas o en el material interestelar del cual se forman estos cuerpos celestes: de hecho, se ha encontrado allí una gran riqueza de material orgánico, se han hallado (por ejemplo, mediante el uso de métodos espectroscópicos en sondas que se aproximaron al cometa Halley) estructuras esponjosas formadas de filamentos y canales que son cuasiunidimensionales y podrían haber llegado a la Tierra debido al bombardeo con meteoritos.

⁵ Recuérdese la célebre metáfora gouldiana según la cual, si nos fuese dado repetir las condiciones iniciales en que apareció la vida en la Tierra y *volver a tocar el cassette*, la sucesión de contingencias sería tan distinta que su resultado podría ser una historia de la vida completamente diferente de como ha sido.

Allí, las temperaturas llegan apenas a 100 K; las formas primarias de energía son la mecánica y la electromagnética –como es el caso de escenarios en donde una fuerza motriz importante es la radiación electromagnética polarizada de los pulsares– y el papel de la energía termodinámica queda en un segundo plano; por consiguiente, las colisiones moleculares disminuyen drásticamente con respecto a las que podrían ocurrir en el medio terrestre: en tal escenario, la frialdad hace completamente improbable la aparición de las primeras formas de vida.

Pero, como fruto del azar y con pocas restricciones, tampoco en nuestro planeta habría sido posible la aparición de la vida: la edad de la Tierra como lugar habitable no sería suficiente; la probabilidad de que ocurriesen síntesis tan complejas en un lapso así de breve es también extremadamente baja.

La controversia entre los biólogos del desarrollo y los evolucionistas darwinianos es vieja ya de varias décadas. Empero, hay elementos en los cuales apoyar una síntesis de las dinámicas del desarrollo embriológico y de la evolución; hoy es posible construir puentes sobre la idea de que la evolución es un sistema dinámico en cuyo espacio fase hay regiones privilegiadas donde la búsqueda se acelera y la probabilidad de asimilación a estructuras antecesoras se vuelve positiva. Es posible, entonces, encontrar una explicación en los mecanismos de restricción del espacio de búsqueda.

Si las mutaciones hubiesen de explorar de manera uniforme en todo el espacio fase potencialmente accesible, el problema sería insoluble. Es decir, en una búsqueda ciega, la probabilidad de aparición del ojo sería prácticamente nula. Entonces, es necesario considerar mecanismos de restricción de la zona de exploración para que ésta se dé en una “tierra prometida”, en un lugar con potencial de integrarse fácilmente a las estructuras y procesos del desarrollo embriológico, presentes de antemano en los ancestros.

Para empezar, veamos la estructura y el funcionamiento de las células: en una primera mirada se les puede considerar recipientes microscópicos, de volumen minúsculo, en donde ocurre un conjunto de reacciones químicas complicadas, base de la vida. Sin embargo, a pesar de su pequeñez, la probabilidad de que –a la temperatura ambiente y por colisiones moleculares azarosas– las reacciones bioquímicas básicas se den con velocidad suficientemente grande es prácticamente nula.

De hecho, esas reacciones sólo pueden suceder a tal temperatura gracias a la aceleración producida por la presencia de enzimas catalizadoras, superficies inhomogéneas sobre las cuales tienen lugar las reacciones químicas, y donde por la acción de fuerzas de Van der Waals (fuerzas atractivas de corto alcance), los sustratos se acomodan y pueden ser deformados en regiones específicas cercanas: la dimensión del espacio de ocurrencia de las reacciones se reduce entonces de tres, un volumen, a dos, una superficie. Además, la inhomogeneidad hace muy probable encontrar los sustratos en determinadas zonas y esto implica aún más restricciones sobre los espacios enzimáticos bidimensionales donde son posibles las reacciones.

Sin embargo, ésta no es toda la historia: hay procesos biológicos esenciales en espacios de dimensión aún menor, cuasiunidimensionales. Tales son los casos de

la copia y transcripción genéticas y de la síntesis de proteínas en el ribosoma celular: estos procesos se dan a lo largo de un canal o filamento y son generalmente unidireccionales; en ellos hay movimiento y transferencia de materia, energía e información a escala molecular, son máquinas moleculares en régimen browniano porque, a las temperaturas a que tienen lugar en la Tierra, las fluctuaciones térmicas son esenciales para su funcionamiento.

Entonces, los procesos responsables de la variabilidad genética y la síntesis de nueva materia viva son máquinas moleculares –para las cuales tanto la energía mecánica como la termodinámica son importantes– trabajando a lo largo de espacios cuasiunidimensionales y, en general, en una sola dirección. Todo esto implica la restricción, en varios órdenes de magnitud, del espacio de búsqueda evolutiva y es incompatible con la idea de que la vida va, como el “relojero ciego” de Richard Dawkins,⁶ haciendo su historia a puro golpe de azar.

También los llamados genes y mutaciones homeóticas –merced a los cuales, por ejemplo, puede suceder que una mosca tenga una pata o un ala en el lugar en donde debería haber una antena– restringen las posibilidades en el espacio de búsqueda. Este tipo de genes es casi ubicuo entre los seres vivos; los hay en una gran variedad de organismos, desde la mosca hasta el hombre, y desempeñan papeles similares aunque no idénticos en el desarrollo embriológico. De hecho, se les puede asociar un “lapso de aparición” y un modo de “montaje específico”; es decir, sólo pueden ensamblarse en una arquitectura génica particular en un momento preciso. Este “montaje modular” es, por consiguiente, otro mecanismo reductor del espacio fase efectivo de la evolución biológica.

Otro puente ha empezado a tenderse, también, desde el área de los sistemas complejos: cuando un sistema de este tipo opera con una dinámica al borde del caos o en zona crítica, las contribuciones a la energía libre termodinámica provenientes de la entalpía y de la entropía (y que tienen signo contrario) casi se cancelan y pueden tener lugar cambios estructurales grandes con cambios energéticos pequeños; de este modo, las diversas escalas estructurales y los tiempos de relajación se presentan simultáneamente y pueden existir transformaciones con poco gasto energético.

En este sentido, a temperatura celular, en los polímeros biológicos como las proteínas y los ácidos nucleicos, la contribución energética de la entropía casi cancela la de la entalpía y se aproximan mucho a la zona crítica en donde se anulan recíprocamente. Por esto y por su carácter cuasiunidimensional la dinámica de los polímeros es flexible. Por otro lado, la presencia en el borde del caos de niveles jerárquicos en todas las escalas espaciales y tiempos de relajación indica que la selección natural actuaría de modo eficiente sobre los diversos niveles de organización.

Por todo lo anterior, la vida no es un artífice inteligente y genial a cuya disposición hay un número infinito de posibilidades para realizar insospechadas obras de arte biológico: al contrario, dispone sólo de un número limitado de herramientas

⁶ Richard Dawkins es un neodarwiniano duro y puro, célebre por las metáforas y trasposiciones a las que suele recurrir en numerosos libros de divulgación como *The Selfish Gene* o *The Blind Watchmaker*.

y métodos porque la naturaleza la sujeta a muchas restricciones y debe resolver los problemas como buenamente puede, con los materiales y en las regiones que la constelación de leyes fisicoquímicas le impone.

Descubrir que los procesos biológicos más importantes no pueden ser el resultado de una larga cadena de casualidades –esto es, no están sometidos al capricho del dios todopoderoso y laico de la selección natural– vuelve la vida más inteligible de lo que hasta ahora habíamos creído. Pero reconocer esto no sólo no disminuye la admiración ante la obra magna de la evolución biológica: por el contrario, ¿acaso no es la vida aún más maravillosa si, entre tantas restricciones, ha podido producir algo tan complejo como el cerebro humano y éste, arquitecto incansable, es capaz de construir puentes entre lugares tan distantes?

BIBLIOGRAFÍA

Mayr, E. y Provine, W. (eds.), 1980. *The Evolutionary Synthesis. Perspectives on the Unification of Biology*. Cambridge, Harvard University Press.

⊙ *Esta es una página en blanco.* ⊙

FENÓMENOS CRÍTICOS Y EVOLUCIÓN AL BORDE DEL CAOS

EN el momento presente, estamos transitando por un periodo de crisis, que afecta muchos de los ámbitos sociales; sin embargo, este fenómeno se ha presentado en varias épocas de la sociedad.

Si nos remontamos a los ideogramas chinos, “crisis” tiene el doble sentido de *peligro y oportunidad*. Si interpretamos el peligro como inestabilidad y la oportunidad como un logro sin costo (por ejemplo de energía) tenemos precisamente las condiciones de un punto crítico, como los estudiados en la física al examinar las transiciones de fase (por ejemplo, la transición de líquido a gas). Se trata de fenómenos colectivos de muchos componentes fuertemente interactuantes y con correlaciones en todas las escalas. Si calentamos un trozo de hielo éste empezará a fundirse y se transformará en agua líquida, y si lo seguimos calentando se transformará en vapor; si enfriamos ese vapor, empezará a condensarse en agua líquida, y si continuamos enfriándolo, se congelará y se convertirá en hielo. En este ejemplo mostraremos qué características tienen esos cambios de fase.¹ Explicaremos una de ellas con el ejemplo del imán: si calentáramos un imán, al llegar a cierta temperatura desaparecería su imantación. No es necesario que se funda el hierro para que se pierdan sus cualidades magnéticas, porque esto ocurre al desaparecer el modo ordenado en que están los átomos en el metal, que es lo que determina las cualidades de atracción del imán. Antes de llegar a la temperatura en que este ordenamiento desaparece, islotes del metal se desordenan y vuelven a ordenarse; estos islotes se vuelven cada vez mayores, hasta que uno de ellos desordena completamente el metal. Lo mismo es válido en la otra dirección: si se tiene un hierro caliente y en presencia de un campo magnético débil bajamos la temperatura, empiezan a aparecer y desaparecer islotes de material imantado hasta que uno de ellos ordena el metal. O sea que una característica fundamental en estos fenómenos de transición son las llamadas fluctuaciones y los mecanismos de amplificación de éstas. De manera similar, en la transición del agua líquida a vapor, si calentamos el agua, cuyas

* Publicado en: Ruelas, E. y Mansilla, R. (coords.), 2005. *Las ciencias de la complejidad y la innovación médica*. México: CEIICH-UNAM / Plaza y Valdés.

¹ Véase por ejemplo: Stanley, E. (1987). *Introduction to Phase Transitions and Critical Phenomena*. International Series of Monograph in Physics.

moléculas se encuentran entre sí a distancias fijas, en un estado ordenado, entonces empezarán a formarse burbujas de vapor desordenado, ya que la distancia entre las moléculas es variable, aparecen y desaparecen, hasta que al llegar a la temperatura de transición de 100 °C una de las burbujas de vapor se amplifica y todo el agua se convierte en vapor.

Normalmente, lejos de las condiciones en que tienen lugar estos cambios de fase, siempre hay fluctuaciones, islotes que aparecen y desaparecen y al acercarnos a las condiciones en que tiene lugar el cambio, estas fluctuaciones se hacen mayores hasta que una de ellas, en vez de desaparecer, reordena el material. Al tener lugar este cambio, no sólo las relaciones entre átomos cercanos (conocidas como *correlaciones de corto alcance*) sino también las relaciones entre átomos lejanos (*correlaciones de largo alcance*) son importantes para que todo el material cambie de estado. Una interacción fuerte de corto alcance produce, así, un comportamiento colectivo con correlaciones en todas las distancias. Como vimos un poco antes del cambio de fase, los fenómenos se presentan en lo que conocemos como *borde del caos*.

Debemos mencionar dos conceptos fundamentales en las transiciones de fase: los *parámetros de orden* y los *parámetros de control*.

Los *parámetros de orden* son aquellos que describen propiedades importantes del sistema en cuestión y que cambian drásticamente en el punto crítico. Volviendo al ejemplo de la transición ferromagnética, el parámetro de orden es la magnetización, es decir, el porcentaje de regiones del sistema que están ordenadas, magnetizadas. En el caso de la transición de líquido a vapor, el parámetro de orden es el porcentaje de "gotitas de líquido". En la fase líquida es de casi 100 %, disminuye rápidamente al acercarse al punto crítico y es casi nulo en la fase de vapor.

Los *parámetros de control* son aquellos cuya variación da lugar a la transición de fase. En los dos casos que hemos considerado, el parámetro de control es la temperatura. En el caso de la transición de agua líquida a vapor, si aumentamos la temperatura del agua, por debajo de 100 °C, se tiene agua líquida, pero al llegar a los 100 °C, en un intervalo muy pequeño de temperatura, el agua se transforma en vapor. La temperatura en que se presenta este fenómeno se denomina *temperatura crítica*, y se dice que el sistema está en el punto crítico. En el caso del ferromagneto, de nuevo el parámetro de control es la temperatura, y en la temperatura crítica el sistema pasa de una magnetización muy grande a una muy pequeña. ¿Qué quiere decir esto? Que es la temperatura la que tiene el papel de afectar a dos sistemas distintos: uno es el hierro y el otro es el agua.

En los dos casos que hemos discutido es claro ver cuáles son los parámetros de orden y control, ya que los dos sistemas son relativamente simples, pero en los sistemas complejos puede haber más de uno de estos parámetros y suele ser difícil encontrar los parámetros pertinentes. En el caso de los sistemas complejos, el encontrar dichos parámetros puede ser una mezcla de ciencia, arte y suerte. Una característica de los sistemas en el punto crítico es que, siendo microscópicamente diferentes (por ejemplo el agua y los ferromagnetos), se comportan cualitativa y cuantitativamente de modo igual una vez que se identifican los parámetros de orden relevantes. Es decir, tienen un comportamiento genérico, y la *generalidad* es

una propiedad de los sistemas en el punto crítico. Muchos sistemas muestran que basta cambiar monotónicamente el parámetro de control para que se dé una cascada de cambios de fase. Por ejemplo, en el caso del agua se tiene vapor por encima de 100 °C, y un poco por debajo, agua líquida; si seguimos disminuyendo la temperatura, al llegar a 0 °C el agua se congela y se transforma en hielo, y si la temperatura sigue disminuyendo, el hielo “normal” se transforma sucesivamente en otras clases de hielo (agua sólida). Otra característica básica de las transiciones de fase es que ocurren cuando existe un conflicto entre fuerzas o factores dinámicos. En los dos ejemplos que hemos discutido, los factores dinámicos en conflicto son la energía interna y la entropía. La energía interna está dominada por la atracción entre las moléculas de agua, y en el caso del imán, por la atracción de los átomos de hierro; esas condiciones tienden a ordenar los componentes, mientras que la entropía, relacionada a la agitación térmica, tiende a desordenar el sistema. Por debajo de la temperatura crítica domina la energía interna y el sistema se ordena, mientras que por encima de esa temperatura domina la entropía y el sistema se desordena. En el punto crítico, en que el valor de la energía interna y la contribución energética de la entropía son iguales, basta una fluctuación infinitesimal de la agitación térmica para que se tengan cambios de fase microscópicos, como es el caso en que las gotitas de agua se transforman en burbujas de vapor y viceversa. Vemos que en los valores críticos de los parámetros de control, sin gasto energético, el sistema fluctúa a nivel microscópico entre diversos estados. La presencia de fluctuaciones de todos los tamaños y escalas es un aspecto fundamental de los sistemas en el punto crítico.

En los sistemas complejos pueden coexistir varios estados, teniéndose fluctuaciones de diversos tipos. En el caso del agua, si aumentamos monotónicamente la temperatura antes de llegar a los 100 °C tendremos burbujas pequeñas de vapor (lo que podríamos llamar *fluctuaciones anterógradas*), y después de esa temperatura tendremos vapor con pequeñas burbujas de agua (lo que podríamos denominar *fluctuaciones retrógradas*). En el caso de los sistemas complejos, estas fluctuaciones anterógradas y retrógradas pueden ser de varios tipos.

Hemos tomado como modelo dos sistemas físicos, pero se puede tener un comportamiento similar en los sistemas biológicos y sociales. Un rasgo interesante de la fisicoquímica de la dinámica de los polímeros biológicos, tales como las proteínas y los ácidos nucleicos, es que, a temperatura ambiental y en solución acuosa, la contribución energética de la entropía casi cancela la de la energía interna, porque están en las condiciones características de una zona crítica (fluctuaciones con bajo costo energético) que permite flexibilidad y facilidad de asociación y disociación. Al constreñir el polímero en la superficie de una enzima, en procesos como la replicación, la reducción dimensional disminuye la contribución entrópica, y la energía interna de enlace se vuelve dominante, por lo que los procesos de apareamiento se vuelven más precisos. Es importante señalar que en este caso, al presentarse las restricciones espaciales, ocurre una mejora de los aspectos funcionales, es decir, la sola disminución del polímero en la superficie tiene como resultado que el proceso de apareamiento se dé con mayor facilidad.

Presentaremos a continuación otros ejemplos de transiciones de fase. Tomaremos como ejemplo los patrones de color en la piel de algunos animales. Se tienen modelos dinámicos discretos, es decir, con presentación periódica variable, y continuos, con presentación periódica continua, que modelan la dinámica de aparición de estos patrones de color. En ambos casos, el mecanismo principal es el de una competencia, conflicto entre la estimulación de corto alcance y la inhibición de largo alcance. En el caso de los modelos continuos de reacción-difusión este conflicto se da entre morfógenos estimuladores y morfógenos inhibidores; mientras que en los modelos discretos, el conflicto se presenta entre la estimulación debida a las interacciones de corto alcance entre las células y la inhibición asociada a los mecanismos de control de tamaño de la morfogénesis.

Otro ejemplo es el comportamiento colectivo de las hormigas. En este caso el conflicto se da entre el comportamiento azaroso o caótico de las hormigas cuando están aisladas y la sincronización que se presenta asociada a su interacción.

Ejemplos adicionales se tienen en la evolución de la ciencia, en particular de las llamadas revoluciones científicas, y en el comportamiento de colectivos humanos. Ambos casos se discuten con cierta amplitud en otras secciones.

Hemos presentado las transiciones de fase en las que se muestra que un pequeño cambio del parámetro de control en la vecindad del punto crítico implica cambios grandes en el parámetro de orden. En la historia evolutiva de los organismos biológicos y de las organizaciones sociales se tienen periodos de cambio lento y otros de cambios muy rápidos en los que pueden darse transformaciones cualitativas importantes. Estas recuerdan las transiciones de fase y se sugiere que cuando tienen lugar esas "revoluciones" biológicas o sociales se ha roto la dominancia y luego el equilibrio de factores en conflicto, lo que podría tener similitudes importantes con los cambios de fase en sistemas físicos. De ser esto cierto, esperaríamos que aspectos fenomenológicos de lo que sucede en sistemas físicos tuviesen su contrapartida en las revoluciones sociales.

Bordes de caos, algunos ejemplos

Los huesos. Podemos recordar que algo similar ocurre en los sistemas del cuerpo humano, aunque en este caso se trata de un sistema muy complejo; podemos ejercer presión cada vez con mayor intensidad en un hueso, llegado a un punto crítico éste se fracturará (cambio de fase).

La piel. Al ejercer presión sobre la piel con un alfiler en un principio se sentirá sólo eso, pero puede llegar el momento en el que la sensación dé paso al dolor (cambio de fase).

KUHN Y LAS REVOLUCIONES CIENTÍFICAS Y SOCIALES

Thomas Kuhn considera que los paradigmas corresponden a revoluciones científicas universalmente reconocidas, y que durante cierto tiempo proporcionan modelos de problemas y de soluciones a una comunidad científica. Algunos párrafos que tomamos de su libro² muestran aspectos básicos de sus planteamientos:

Época preparadigmática: Las primeras etapas de desarrollo de la mayor parte de las ciencias se han caracterizado por una competencia continua entre una serie de concepciones distintas de la naturaleza, cada una de las cuales se derivaba parcialmente de la observación y del método científico; hasta cierto punto, todas eran compatibles con él. Lo que diferenciaba a esas escuelas no era uno u otro error de método –todos eran “científicos”– sino lo que se podría denominar sus modos inconmensurables de ver el mundo y de practicar las ciencias en él.

La *ciencia normal* consiste en la ampliación del conocimiento de aquellos hechos en que el paradigma se muestra como particularmente revelador, aumentando la extensión del acoplamiento entre esos hechos y las predicciones del paradigma.

El periodo anterior al paradigma suele estar marcado regularmente por debates frecuentes y profundos sobre métodos, problemas y normas de soluciones. Se producen poco antes de que aparezcan las revoluciones científicas.

Es sobre todo en los periodos de crisis reconocida cuando los científicos se dirigen hacia el análisis filosófico como instrumento para resolver los enigmas de su campo. Al enfrentarse a anomalías o crisis, los científicos adoptan una actitud diferente hacia los paradigmas existentes y, en consecuencia, su actitud cambia. La proliferación de articulaciones en competencia, la disposición para ensayarlo todo, la expresión del descontento explícito, el recurso a la filosofía y el debate sobre los fundamentos son síntomas de una transición de la investigación normal a la investigación no ordinaria.

Revoluciones políticas y científicas. Las revoluciones políticas se inician por un sentimiento cada vez mayor, restringido frecuentemente a una fracción de la comunidad política, de que las instituciones existentes han cesado de satisfacer adecuadamente los problemas planteados por el medio ambiente que en parte han contribuido a crear.

De manera muy similar, las revoluciones científicas se inician con un sentimiento creciente, también a menudo restringido a una subdivisión de la comunidad científica, de que un paradigma existente ha dejado de funcionar adecuadamente en la exploración de un aspecto de la naturaleza hacia el cual había mostrado previamente el camino.

Las revoluciones políticas tienden a cambiar las instituciones políticas utilizando modos que esas mismas instituciones prohíben. Por consiguiente, su éxito exige el abandono parcial de una serie de instituciones en favor de otra y, mientras tanto, la sociedad no es gobernada completamente por ninguna institución. En números crecientes, los individuos se alejan cada vez más de la vida política y se comportan de manera cada vez más excéntrica en su interior. Luego, al hacerse más profun-

² Kuhn, T. S. (1987). *La estructura de las revoluciones científicas*. México: Fondo de Cultura Económica.

da la crisis, muchos de esos individuos se comprometen con alguna proposición concreta para la reconstrucción de la sociedad en una nueva estructura institucional. En este punto, la sociedad se divide en campos o partidos enfrentados, uno de los cuales trata de defender el cuadro de las instituciones antiguas, mientras que los otros tratan de establecer otras nuevas. Y una vez que ha tenido lugar esta polarización, el recurso político fracasa. Debido a que tienen diferencias respecto a la matriz institucional dentro de la cual debe tener lugar y evaluarse el cambio político, puesto que no reconocen ninguna estructura suprainstitucional para dirimir sus discrepancias, las partes de un conflicto revolucionario deben recurrir a las técnicas de persuasión de las masas, incluyendo frecuentemente el uso de la fuerza.

El estudio histórico del cambio de paradigmas revela características muy similares en la evolución de las ciencias. Como en la elección entre las instituciones políticas que compiten entre sí, la elección entre paradigmas en competencia resulta una elección entre modos incompatibles de vida de la comunidad. Debido a que tiene ese carácter, la elección no está ni puede ser determinada por los procedimientos de evaluación característicos de la ciencia normal, pues estos dependen de un paradigma en particular, el cual está siendo sometido a discusión.

Pero los cambios de este tipo nunca son totales. Sea lo que fuere lo que pueda ver el científico, después de una revolución está mirando el mismo mundo. Además, aun cuando haya podido emplearlos antes de manera diferente, gran parte de su vocabulario e instrumentos de laboratorio serán todavía los mismos.

Aunque las crisis prolongadas probablemente se reflejan en prácticas menos rígidas de educación, la preparación científica no está bien diseñada para producir el ser humano que pueda descubrir con facilidad un enfoque original. Pero en tanto haya alguien que se presente con un nuevo candidato a paradigma –habitualmente una persona joven o un novato en el campo– la pérdida de la rigidez corresponderá sólo al individuo.

Los planteamientos de Kuhn sobre las revoluciones científicas tienen muchos rasgos en común con los cambios de fase debidos a la amplificación de las fluctuaciones antes mencionadas. Tanto en las revoluciones científicas como en las sociales se presentan “fluctuaciones retrógradas” en que aparecen estructuras y puntos de vista del pasado, y “fluctuaciones anterógradas” en que transitoriamente aparecen estructuras y puntos de vista que luego desaparecen, pero que pueden ser dominantes en revoluciones futuras.

CAMBIO RÁPIDO Y OBSOLESCENCIA

Una característica del mundo actual es el cambio rápido en la mayor parte de sus aspectos y la rápida obsolescencia de la información. La concepción de los cambios válidos y su velocidad han cambiado a lo largo de la historia. En lo referente a Europa, citando a Wallerstein:³

³ Wallerstein, I. (1995). *After Liberalism*. New York, The New Press, pp.94–96. Traducción del autor.

Antes de la Revolución Francesa, un aspecto fundamental era la normalidad de la estabilidad política. La soberanía residía en el gobernante y sus derechos, derivados de un conjunto de reglas respecto a la adquisición del poder, usualmente por herencia. El cambio político era excepcional, justificable sólo excepcionalmente, y cuando ocurría no se pensaba que sentase un precedente para cambios posteriores. Después de 1848, todos los tipos de cambio, incluyendo cambios políticos, se consideraron "normales". Durante el periodo de 1769 a 1848 tuvo lugar una evolución de las posiciones conservadoras hacia lo que se podría considerar la posición conservadora dominante en los últimos 150 años: el cambio "normal" debe ser tan lento como sea posible y debe ser promovido sólo cuando esté cuidadosamente justificado como necesario para prevenir una rotura mayor del orden social. El liberalismo fue la respuesta ideológica al conservacionismo. La distinción esencial entre liberalismo y socialismo no es sobre la deseabilidad y aun sobre la inevitabilidad del cambio (o progreso). Esta visión del cambio formaba su tronco común. La diferencia más que ideológica era política.

Los liberales creían que el curso del mejoramiento social era, debía ser, uniforme, basado en una valoración racional de los problemas existentes, realizada por especialistas y una labor continua consciente de los líderes políticos a la luz de tal valoración, con el fin de introducir reformas sociales inteligentes.

Los socialistas eran escépticos respecto a la posibilidad de que los reformistas pudieran llevar a cabo cambios significativos a través de inteligencia y buena voluntad, y casi sólo con el apoyo de ellos mismos. Los socialistas querían ir más rápido y argüían que sin una presión popular considerable el proceso no daría lugar a progreso. El progreso era inevitable sólo porque la presión popular era inevitable, y sin esta presión popular los especialistas se verían impotentes.

Estamos en un mundo en cambio rápido, quizás en lo que podríamos llamar una "revolución permanente". Siguiendo con Wallerstein:

Hemos entrado en una nueva era en términos de mentalidades. Por un lado, tenemos una llamada apasionada por la democracia. Sin embargo, esta llamada no es del cumplimiento del liberalismo sino de su rechazo. Es la afirmación de que el sistema mundial actual no es democrático, ya que no se comparte por igual el bienestar económico debido a que el poder político no está igualmente distribuido. La desintegración social, y no un progreso sistemático, es lo normal en el momento actual, y cuando hay desintegración social la gente busca protección.

En el pasado la gente vio al Estado como fuente de cambio seguro, pero ahora se dirigen a solidaridades de grupo (de todo tipo de grupos) en busca de protección. Esto es un juego diferente, y no es seguro cómo se jugará este juego en los próximos cincuenta años, pues, por un lado, no sabemos cómo trabaja tal sistema y, por otro, las fluctuaciones de un sistema mundial en desintegración son muy grandes.

Navegaremos mal durante el periodo que se avecina si no somos conscientes de que ninguna de las ideologías (agendas para la acción política) que han gobernado nuestras acciones durante los últimos doscientos años han sido completamente útiles. Sin embargo, no podemos desecharlas radicalmente pues nos

serán muy provechosas en el futuro. Hay que tener en cuenta que el desorden que parece avvicinarse no es necesariamente peor (o mejor) que el orden. Sin embargo, requiere un modo diferente de acción y reacción.⁴

Frente al cambio rápido, frente a esta revolución permanente, se tiene el problema de la obsolescencia del conocimiento. En su libro *Instrumental para o pensamento*,⁵ Waddington propone lo siguiente:

Sería optimista pensar que alguien sepa realmente lidiar con esta situación, la solución será probablemente alguna mezcla de:

- a. Enseñanza de principios generales que se volverán anticuados de un modo más lento,
- b. Métodos de enseñanza para buscar rápidamente y en una zona amplia la información fáctica actualizada que colocará carne sobre estos huesos cuando sea necesario aplicar,
- c. Métodos de enseñanza para clasificar la información en una jerarquía de categorías, de modo que los ítems relevantes a un contexto particular puedan ser filtrados rápidamente,
- d. Inducir motivaciones para continuar la autoeducación después de haber terminado el periodo de educación formal. Sin embargo, queda por estudiar lo que sería exactamente esta mezcla y cómo se alcanzarían estos propósitos.

Por otro lado, frente a un mundo en crisis y con poca predictibilidad cabe mencionar el párrafo final del libro *Caníbales y reyes* de Marvin Harris.⁶

Puesto que los cambios evolutivos no son plenamente predecibles, es obvio que en el mundo cabe lo que llamamos libre voluntad. Cada decisión individual de aceptar, resistir o cambiar el orden actual altera la probabilidad de que se produzca un resultado evolutivo específico. En tanto el curso de la evolución cultural nunca está libre de la influencia sistemática, probablemente algunos momentos son más “abiertos” que otros. Considero que los momentos más abiertos son aquellos en los que un modo de producción alcanza sus límites de crecimiento y pronto debe adoptarse un nuevo modo de producción. Estamos avanzando rápidamente hacia uno de esos momentos de apertura. Cuando lo hayamos atravesado, y sólo entonces, al mirar hacia atrás, sabremos por qué los seres humanos eligieron una opción y no otra. Entretanto, la gente que tiene un profundo compromiso personal con una determinada visión del futuro está plenamente justificada en la lucha por sus objetivos, aunque hoy los resultados parezcan remotos e improbables. En la vida, como en cualquier partida cuyo resultado depende tanto de la suerte como de la habilidad, la respuesta racional en caso de desventaja consiste en luchar con más vehemencia.

⁴ Wallerstein, I. Op. cit., pp.106–107.

⁵ Conrad Hal Waddington (1979). *Instrumental para o pensamento*. Editorial de la Universidad de Sao Paulo, p. 35. Traducción del autor.

⁶ Harris, M. (1986). *Caníbales y reyes: El origen de las culturas*. Barcelona: Salvat, p. 247.

COMUNIDADES DE PRÁCTICA

Las comunidades de práctica son redes informales que coexisten con la estructura formal de las organizaciones y sirven para propósitos tales como: resolver conflictos entre las metas de la institución a la que pertenecen, resolver problemas de modo más eficiente y ayudar a alcanzar los objetivos de sus miembros.

A pesar de la falta de reconocimiento oficial, estas redes informales pueden dar lugar a modos efectivos de aprendizaje, proporcionando un sentido de pertenencia y, con los incentivos adecuados, aumentar la productividad de la organización formal.

Desde un punto de vista social, cuando estas redes informales aparecen, generan sus propias normas, patrones de interacción, constituyendo lo que se ha denominado recientemente comunidades de práctica.

Uno quisiera encontrar los mecanismos generales comunes a estas comunidades de práctica y cómo dependen de variables como el tamaño y la diversidad de la organización, la capacidad de sus miembros para comunicarse entre sí, la naturaleza de los problemas que atacan, los incentivos que hacen que la gente se una a estas comunidades y la estructura y costo de sus medios de comunicación.

El número de individuos con los cuales cualquier miembro de la comunidad puede comunicarse dará lugar a diversos patrones de interacción, desde una estructura uniforme en la que cada miembro se comunica con todos los demás, hasta una estructura en cúmulos en la que un individuo dado colabora con un número pequeño de otros miembros.

Uno quisiera también saber cómo evolucionan estas comunidades y de qué modo las estructuras resultantes dependen del tamaño del grupo y de la diversidad de las habilidades presentes. Se debe tomar en cuenta explícitamente que el éxito de un individuo que trata de resolver un problema puede a menudo facilitarse mediante el intercambio de información con otros miembros de la comunidad y, que esta información, en general, no es perfecta e incluso puede ser no adecuada para la tarea.

Los individuos tienen que aprender a identificar a aquellos miembros de la comunidad con los que la interacción será más fructífera, y con frecuencia esto resulta en un patrón de interacción en que la escala de interacción crece con la percepción de la utilidad mutua. Este patrón casi nunca es estático, porque aunque el problema no cambie, los individuos que hacen contribuciones importantes pueden variar con el tiempo.

Se pueden formular modelos matemáticos que tomen en cuenta la diversidad y el tamaño del grupo, la estructura de la red cuando el número de individuos cambia con el tiempo y la estabilidad frente a fluctuaciones. Se puede introducir un mecanismo de aprendizaje explícito que dé lugar a cambios locales en la estructura, mostrándose que estos cambios locales dan lugar a un mayor rendimiento de la comunidad como un todo.

PUENTES, INTERFASES INTELIGENTES Y OBJETOS FRONTERIZOS

Guston⁷ ha analizado y discutido lo que denomina *objetos y organizaciones fronterizas* que se sitúan entre mundos sociales diferentes, tales como la ciencia y la no-ciencia, y que pueden ser utilizados por diversos individuos para propósitos específicos distintos, sin perder su identidad.

Las organizaciones de frontera pueden servir de puente entre la ciencia y la política, mediando entre los científicos y sus organizaciones, por un lado, y los organismos que financian la ciencia, por otro, facilitando la interacción de los actores que se encuentran en un lado y en otro de la frontera.

Estas organizaciones se basan en la idea de que la frontera entre la ciencia y las políticas científicas se construye socialmente, y que lo que es ciencia y lo que es política científica se determinan a través del trabajo en la frontera: la contestación y la negociación delimitan la frontera (y sus instituciones asociadas) y definen lo que está de cada lado.

Otro papel de la contestación y la negociación, útil también, es propiciar interacciones entre niveles de organización, relacionando así ciencia y política científica entre diferentes niveles.

Las organizaciones y objetos fronterizos forman parte de lo que podríamos llamar *puentes e interfases inteligentes*, lo que incluye, en muchos casos, los modelos teóricos y matemáticos que pueden servir de puentes conceptuales.

ENFERMEDADES COMPLEJAS Y UNA ANÉCDOTA

Las enfermedades cardíacas, el cáncer, la diabetes y las afecciones psiquiátricas son padecimientos comunes y constituyen difíciles problemas de salud. Todas son enfermedades “complejas” o “multifactoriales”, no están relacionadas o condicionadas al influjo de un solo gene o a un solo factor ambiental, sino que se originan con la acción combinada de muchos genes, factores ambientales y conductas de riesgo.

Uno de los grandes retos que enfrenta la investigación biomédica es tratar de descubrir y ver cómo interaccionan estos factores, de modo que se puedan realizar estrategias efectivas para el diagnóstico, la prevención y el tratamiento de dichas enfermedades.

Sin duda, los genes contribuyen en la generación de estas enfermedades complejas; sin embargo, puesto que el efecto en su génesis es tan pequeño, la identificación de su papel en el riesgo de producir la enfermedad se hace muy complicado, y probablemente puede haber un factor adicional que condicione un efecto de mayor magnitud, que, a la vez, sea modificado por otros genes o por factores ambientales.

Nos hemos referido a enfermedades tan comunes como la diabetes, diversos tipos de cáncer, enfermedades psiquiátricas como la esquizofrenia y enfermedades inmunológicas como el lupus, sin embargo, aún no queda claro que podamos

⁷ Guston, D. H. (2000). *Between Politics and Science: Assuring the Integrity and Productivity of Research*. New York: Cambridge University Press.

clasificarlas como “enfermedades complejas”, pero si las denominamos así, también puede incluirse en esta supuesta clasificación de complejidad a enfermedades degenerativas tales como los trastornos vasculares coronarios y cerebrales.

Para dichas enfermedades “complejas”, una posible estrategia para poder conocerlas mejor y combatirlas más eficientemente sería buscar “el punto débil”, es decir, buscar al “culpable”, el “parámetro de orden” cuyo control permita vencer a la enfermedad. Esto se puede hacer a partir de una prevención efectiva o incidiendo en algún “cuello de botella” que esté presente, independientemente del peso de los diversos factores patogénicos.

Como ejemplo, cabe mencionar la prevención de la diabetes tipo 2, el cáncer de colon y los accidentes vasculares coronarios o cerebrales. Existen estudios que muestran que se pueden evitar hasta en 80 % estas enfermedades con seguir únicamente medidas como realizar ejercicio físico, no fumar, controlar el peso, seguir una dieta equilibrada e ingerir ácido fólico; también se ha mencionado como coadyuvante del control de los cuerpos cetónicos. Tal como puede observarse, estas medidas supuestamente indirectas parecen tener verdadera importancia y sus efectos benéficos están a la vista (véase la figura 1).

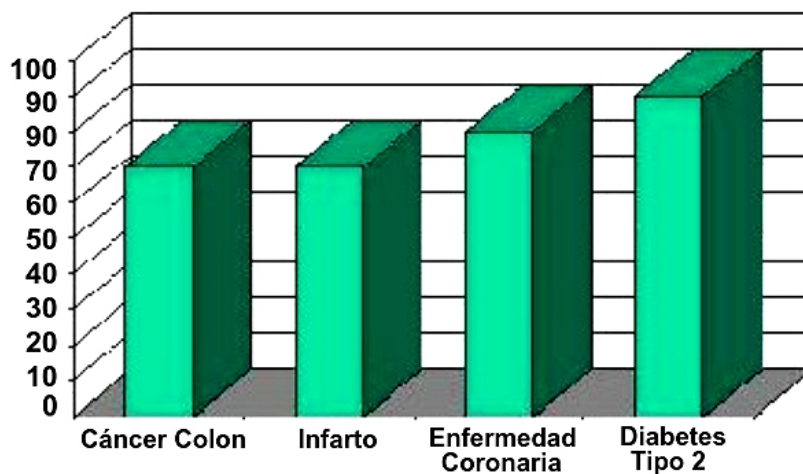


Figura 1: Porcentajes en la gráfica de cáncer de colon, infarto, enfermedad coronaria, diabetes tipo 2 que son potencialmente prevenibles por modificación del estilo de vida. Fuente: “The Puzzle of Complex Diseases”, *Science* 296: 686–703, 2002.

Para cáncer de colon, la definición de bajo riesgo incluye un índice de cuerpo masa menor a 25 kg/m², ejercicio físico equivalente a más de treinta minutos de caminata al día con paso acelerado, ingesta de ácido fólico de 100 mg, beber menos de tres vasos de bebidas alcohólicas al día, no fumar nunca y no comer carne roja más de tres veces a la semana. Para el caso de infarto cardiaco y problemas coronarios, la definición de bajo riesgo incluye no fumar, seguir una dieta adecuada (incorporando una baja ingesta de grasas saturadas) que incluyen grasas

poli-insaturadas, ácidos grasos n-3, fibras y ácido fólico, un índice de masa menor de 25 kg/m² y actividad física mayor a 30 minutos de caminata por día a paso rápido y un consumo moderado de alcohol. Para diabetes, la definición de bajo riesgo es similar a la de padecimiento coronario, excepto que la dieta no incluye ácido fólico o ácidos grasos n-3.

COMENTARIOS FINALES

El sistema de salud mundial, y en nuestro caso, el nacional, se han vuelto económicamente muy onerosos, lo que contrasta con la problemática de la pobreza de las mayorías, a lo cual hay que sumar también el aumento de la esperanza de vida. Esto casi nos hace sentir impotentes ante las enfermedades degenerativas. Es importante destacar que, como se ha mencionado anteriormente, en muchos casos el factor principal condicionante de la problemática es de tipo humano, siendo posible la prevención potencial en 80 % de algunas enfermedades degenerativas, tales como el carcinoma cérvico-uterino, cuya frecuencia disminuye drásticamente si se controla la infección del virus del papiloma humano. En países como Dinamarca y Cuba se ha controlado casi totalmente este tipo de cáncer, mientras que en México sigue siendo un problema de primera magnitud.

Lo anterior está relacionado con los fenómenos críticos; es importante tomar en cuenta los conceptos de parámetro de orden (buscar al “culpable”) y de control (“meterlo en cintura”). Con frecuencia se conoce al culpable (por ejemplo, la falta de hábitos higiénicos y medidas que sirvan de prevención), pero no se conocen, hasta el momento, parámetros de control útiles, o bien, se ha fracasado al tratar de modificar los parámetros de control que se tienen y que no han mostrado utilidad.

Lo anterior suele acontecer con las “campañas de salud” en radio y televisión, con las que no se tiene éxito a pesar de invertir recursos financieros considerables, y esto se debe, en gran parte, a la desconfianza del público, a “prescripciones morales” o a la falta de conocimiento de los encargados de la publicidad, lo que redundo en sugerencias poco prácticas o realistas. Quizá lo que se necesita son “puentes e interfases inteligentes” entre el sistema de salud y los usuarios potenciales.

Con relación a esto, recuerdo un ejemplo anecdótico interesante de mis tiempos de estudiante de medicina, cuando con otros compañeros realizábamos el servicio social en un pueblo de Iztapalapa. Teníamos un buen entrenamiento y la posibilidad de regalar las medicinas, pero llegaba muy poca gente, pues prefería acudir a un médico privado que iba dos tardes por semana. En esto, uno de los compañeros tuvo una idea brillante, hablar con el párroco. Le presentamos el problema y nos dijo que no nos preocupáramos y que el domingo, desde el púlpito, aconsejaría a los feligreses. ¡Mano de santo! A partir del lunes siguiente llegaron en tropel. En este caso el párroco sirvió de “interfase inteligente”, generando confianza y soporte en ambos lados.

Aunque esto fue un incidente aislado, y hay que tener en cuenta que el utilizar a la iglesia como interfase inteligente puede tener consecuencias negativas, cabe preguntarse cuáles serían las interfases inteligentes en las campañas de salud.

Las campañas deberían contar con la confianza tanto del sistema de salud como del público, y los mensajes transmitidos debieran de ser realistas, lo que no suele pasar con los transmitidos por medios de comunicación masiva, como el radio y la televisión. Habrá que buscar interfases locales que puedan ser útiles, es decir, que jueguen el papel que llevó el sacerdote en nuestro caso, de tal manera que estas interfases puedan ser útiles en la solución de otros problemas de salud.

Aunque en las grandes ciudades la problemática se complica, pues con frecuencia predominan el egoísmo, la desconfianza e inclusive la delincuencia, una táctica posible es la búsqueda de soluciones locales.

Además, no podemos olvidar otro problema importante que está relacionado con la interacción entre el sistema de salud y las fuentes de financiamiento, tema que se abordó ya en el capítulo relacionado con economía y finanzas.

Como comentábamos anteriormente, las organizaciones de frontera y las interfases inteligentes, pueden ser de gran utilidad. Sin embargo, esto no debe implicar el crear nuevas estructuras burocráticas. Para evitar esto, ahora podemos tomar en cuenta una de las lecciones de “las redes de mundo pequeño”, fenómeno que implica, entre otras cosas, que en el planeta en que vivimos, habitado más o menos por seis mil millones de personas, prácticamente todos estamos conectados en una apretada red, y al cual también se le ha llamado “seis grados de separación”. Según esta teoría, Marconi conectó al mundo con un sistema de comunicaciones, y sólo se requieren en promedio 5.8 estaciones para ligar a cualquier persona con otra. Asimismo, Duncan Watts⁸ aporta posibles soluciones a problemas de ciencias sociales, de políticas públicas y de economía (sobre oferta y demanda de productos), y otras muchas aplicaciones en sistemas de redes.

El estudio de este mundo pequeño nos indica que lo prudente es buscar la cohesión local y el mínimo de pasos intermedios con otros niveles o estructuras equivalentes del mismo nivel. Nos enfrentamos a factores contradictorios, y en esto el modelado con las herramientas de los sistemas complejos puede ayudar a diseñar estrategias óptimas que sean además flexibles.

Un tópico adicional es el referente a las organizaciones informales, asociadas a las comunidades de práctica. Estas estructuras informales pueden implicar relaciones adicionales entre niveles jerárquicos o instituciones del mismo nivel. Un caso con implicaciones potenciales positivas es el de las relaciones de familia, de amistad o los hábitos y creencias comunes, que muchas veces implican puentes más efectivos que las relaciones formales. Como en otros casos de comunidades de práctica, éstas pueden implicar aspectos negativos, tales como las mafias, pero el tener en cuenta las relaciones humanas, más allá de las reglas formales, puede ser un punto de partida para la solución de muchos problemas.

Debe agregarse que, además de buscar soluciones y planteamientos generales en gran escala, es necesario poner en práctica organizaciones experimentales en pequeña escala que permitan recopilar información necesaria en la búsqueda de soluciones generales.

⁸ Watts, D. (1999). *Small Worlds: The Dynamics of Networks between Order and Randomness*. Princeton: Princeton University Press.

Un análisis del primer nivel de atención médica del sistema de salud y el diseño de proyectos experimentales dentro de él serían algunos de los puntos de partida. Parte de la problemática de este nivel de atención es la carga de trabajo de los médicos y las enfermeras, los largos tiempos de espera y el trato despótico que, a veces, reciben los pacientes y sus acompañantes. En ocasiones también acontecen relaciones conflictivas dentro del personal médico y el equipo de salud; surgen entonces algunas preguntas y propuestas: ¿podría disminuirse la carga de trabajo de los médicos y las enfermeras, al utilizarse los tiempos de espera para incrementar el conocimiento médico que poseen los pacientes y sus acompañantes? Tal vez los tiempos de espera podrían ser empleados para la educación médica de los pacientes y sus acompañantes mediante exposiciones y videos relacionados con medidas preventivas y aspectos de automedicación. Una meta sería que estas actividades sirvieran de catalizador para que, en el ámbito local, en los barrios y en las colonias, se realizasen actividades similares. Esto podría constituir lo que denominaríamos *nivel cero*.

EL MEDIO INTERESTELAR Y EL ORIGEN DE LA VIDA *

MI vida científica ha transcurrido a lo largo de los últimos 40 años, desde principios de la década de 1970 hasta el momento actual. Aunque primero estudié medicina, luego me dediqué a la investigación en física y, en particular, a la física teórica. En estos 40 años, he visto cómo el principal énfasis de la física ha pasado de la frontera de lo muy pequeño (la física de las partículas elementales) a la cosmología y, en el momento actual, a los sistemas complejos y a la biología como fuente de problemas y enfoques para una “nueva física”.

Como etapas de la evolución de la física de lo muy pequeño, a lo largo de los últimos 40 años, podemos mencionar:

- Modelos de las partículas fundamentales con grupos unitarios y el modelo de quarks.
- Los experimentos en Stanford en que se encuentran en las partículas “centros duros” con las características de los quarks.
- La teoría del campo cuántico que lleva el nombre de cromodinámica cuántica y que explica la mayoría de los experimentos de las partículas que interactúan fuertemente.
- El denominado modelo estándar en que se unifican las interacciones electromagnéticas y débiles.
- La interrelación entre la física de lo muy pequeño (partículas elementales) y la de lo muy grande (cosmología). Una nueva síntesis cielo-Tierra, la anterior fue la de la gravitación universal de Newton.
- El énfasis en las relaciones entre la teoría del campo cuántico y la física estadística, en que se muestra que la física estadística es más general que la teoría del campo cuántico. Asociado a este “puente” entre dichas disciplinas muchos físicos de partículas elementales se cambiaron a física estadística. Ese fue mi caso.

* Publicado en: Paredes López, O. y Estrada Orihuela, S. (coords.), 2008. *Aportaciones científicas y humanísticas mexicanas en el siglo XX*. México: FCE, Consejo Consultivo de Ciencias, CONACYT, Academia Mexicana de Ciencias.

- Investigadores de la física estadística en busca de problemas no tradicionales estudian problemas complejos y en particular problemas biológicos. De nuevo, este fue mi caso.

A lo largo de este periodo, mi labor de investigación siguió una evolución paralela a la de la física. Me recibí de médico-cirujano, estando asociado en los últimos tres años a la Unidad de Patología, dirigida por Ruy Pérez Tamayo, queriendo dedicarme a la investigación básica biomédica, de ser posible utilizando modelos teóricos de tipo físico. Con esta motivación, seguí la licenciatura en física en la Facultad de Ciencias de la UNAM. En esa época, la física de las partículas elementales era la reina de la investigación científica, quedé atrapado por ella, me doctoré en física teórica en la Universidad de Princeton y durante muchos años realicé investigaciones sobre la física de partículas elementales y la teoría del campo cuántico. Luego seguí el tránsito mencionado anteriormente: de la física cuántica a la física estadística y a los sistemas complejos biológicos, contribuyendo a formar primero un programa y luego el Departamento de Sistemas Complejos en el Instituto de Física de la UNAM. En esto nos adelantamos a universidades de Europa y de Estados Unidos. Dentro de esta línea de investigación, he realizado investigaciones sobre la dinámica del SIDA y sobre el problema del origen de la vida en la Tierra. Es sobre este último tema que presentaré aspectos de su problemática y de mi enfoque de investigación.

EL ORIGEN DE LA VIDA EN LA TIERRA. LOS PROBLEMAS DE LA VENTANA TEMPORAL Y DE LA QUIRALIDAD

El origen de la vida en la Tierra es un tema que ha preocupado y ha sido base de controversias religiosas, filosóficas y científicas a lo largo de la historia, en particular, la cuestión de si los organismos vivos se han originado a partir de otros organismos vivos iguales a ellos hasta llegar en el remoto pasado a un acto de creación o si se pueden formar por generación espontánea en tiempos cortos. Para los egipcios, los cocodrilos se originaban a partir del barro del Nilo, y en la Edad Media europea se pensaba que se creaban ratones a partir de comida y trapos sucios y que las moscas se generaban en la carne descompuesta. Con experimentos se eliminaron estas posibilidades, y se propuso que aunque la generación espontánea no fuese válida para organismos macroscópicos, quizás lo sería para microorganismos. Los experimentos de Luis Pasteur eliminaron esta posibilidad, creyéndose que finalmente se había probado que la generación espontánea no podía tener lugar. Sin embargo, había una hipótesis implícita: esto se refería a la generación espontánea en tiempos cortos; y con la teoría de la evolución de Charles Darwin, en que la evolución biológica tiene lugar en tiempos muy largos, con esta evolución yendo de lo simple a lo complejo, se tuvo la posibilidad de que los organismos vivos pudieran haberse originado a partir de materia inanimada, mediante procesos que tuvieron lugar en tiempos muy largos. En la década de 1920, Alexander I. Oparin en la Unión Soviética y J. B. S. Haldane en Inglaterra, presentan un escenario para el origen de la vida

en la Tierra, en tiempos lejanos cercanos a la formación de nuestro planeta. Supusieron que la atmósfera primitiva fue reductora, siendo importante la presencia de hidrógeno, metano y amoníaco, y que con relámpagos y volcanes como fuente de energía, se habrían formado compuestos orgánicos prebióticos. Estos compuestos al caer al mar serían la base de una evolución química hacia los organismos vivos. Más tarde, en 1952, Stanley Miller, en la Universidad de Chicago, lleva a cabo experimentos en que con mezclas de gases reductores y diversas fuentes de energía se generan compuestos orgánicos, incluyendo aminoácidos.

4	5	6	7	8	9	10	11	13
c-C ₃ H	C ₃	C ₃ H	C ₆ H	CH ₃ C ₂ H	CH ₃ C ₂ H	CH ₃ C ₂ N?	HC ₉ N	HC ₁₁ N
1-C ₃ H	C ₃ H	1-H ₂ C ₄	CH ₂ CHCH	HCOOCH ₃	CH ₃ CH ₂ CN	(CH ₃) ₂ CO		
C ₃ N	C ₃ Si	C ₂ H ₄	CH ₃ C ₂ H	CH ₃ COH?	(CH ₃) ₂ O	NH ₂ CH ₂ COOH?		
C ₃ O	1-C ₃ H ₂	CH ₃ CN	HC ₃ N	C ₃ H	CH ₃ CH ₂ OH			
C ₃ S	c-C ₃ H ₂	CH ₃ NC	HCOCH ₃	H ₂ C ₆	HC ₂ N			
C ₂ H ₂	CH ₂ CN	CH ₃ OH	NH ₂ CH ₃		C ₈ H			
CH ₂ D ⁺ ?	CH ₄	CH ₃ SH	c-C ₂ H ₄ O					
HCCN	CH ₃ N	CH ₃ NH ⁺						
HCNH ⁺	HC ₂ NC	HC ₃ CHO						
HNCO	HCOOH	NH ₂ CHO						
HNCS	H ₂ CHN	C ₃ N						
HOCO ⁺	H ₂ C ₂ O							
H ₂ CO	H ₂ NCN							
H ₂ CN	HNC ₃							
H ₂ CS	SiH ₄							
H ₃ O ⁺	H ₂ COH ⁺							
NH ₃								
SiC ₃								

Figura 1: Moléculas interestelares y circunestelares según Al Wootten (véase el texto).

En paralelo con este enfoque experimental, se estudian registros fósiles cada vez más primitivos, y se llega a encontrar lo que se considera restos de bacterias de hace 3,800 millones de años. Como se estima que la Tierra tiene una edad de 4,500 millones de años y que durante los primeros 600 millones de años las temperaturas eran muy elevadas, lo que descompondría los compuestos orgánicos prebióticos, queda una ventana temporal muy pequeña para la evolución de estos compuestos orgánicos prebióticos a bacterias primitivas. Es lo que podemos denominar el problema de la ventana temporal. Esta dificultad, aunada a que parece que la atmósfera primitiva no era reductora, llevó a preguntarse si material prebiótico y estructuras protobióticas pudieran provenir del espacio exterior, ya que se habían encontrado aminoácidos en meteoritos, aunque existía la controversia de si eran originarios o resultado de contaminación posterior.

En 1986, aprovechando la cercanía del cometa de Halley, la sonda Giotto con un espectrógrafo de masas encuentra en el cometa la presencia de un gran número de compuestos orgánicos (Kissel y Krueger, 1997). Como los cometas son fuente de meteoritos que caen a la Tierra, se tiene otra fuente de material prebiótico. Por otro

lado, existe evidencia de que los cometas se originan a partir de material interestelar. Mediante espectroscopía se buscó la presencia de compuestos orgánicos y se encontró un gran número de ellos.

Como se muestra en la figura 1, en el medio interestelar se encuentran especies moleculares con un número grande de átomos, llegando hasta 13 átomos y predominando los compuestos del carbono. También se ha encontrado evidencia de la presencia de diversas formas de la física y química del carbono. Por ejemplo, se tiene desde formas tradicionales como cadenas cortas, hollín y grafito hasta fulerenos y nanotubos. También se encuentran hidrocarburos poliaromáticos formados por un número más o menos grande de anillos de carbono. Cabe especular que dado el “carácter oportunista” de la naturaleza, ésta habría utilizado estas estructuras para “resolver algunos de sus problemas”. Veremos que es probable que éste sea el caso.

Un problema fundamental en el origen de la vida es el de la quiralidad biológica. Las moléculas en general, y en particular la mayoría de las moléculas orgánicas, pueden existir en dos formas, con quiralidad dextrógira y levógira, según desvíen la luz polarizada hacia la derecha o hacia la izquierda. Podemos decir que estas moléculas presentan la estructura de un tornillo y que su rosca puede girar hacia la derecha o hacia la izquierda. En los organismos vivos, los aminoácidos, “ladrillos” elementales de las proteínas, y los ácidos nucleicos, que constituyen los genes, tienen quiralidad definida; los aminoácidos biológicos son levógiros, con “tornillo” izquierdo, mientras que los ácidos nucleicos son dextrógiros, con “tornillo” derecho.

Las moléculas que no pertenecen a los organismos vivos presentan la forma racémica, en la cual en promedio la mitad son dextrógiros y la mitad levógiros. En principio, la dinámica de las moléculas dextrógiros y de las levógiros es la misma y se presenta la pregunta de cómo y por qué estas moléculas biológicas tienen quiralidad definida. Una hipótesis atractiva es asociar esto a las llamadas interacciones débiles de las partículas elementales, lo que implicaría que en todo el universo la vida tiene la misma quiralidad. Estas interacciones violan la paridad y pueden seleccionar energéticamente moléculas de quiralidad definida; sin embargo, estas interacciones son muy, muy débiles, y para que este mecanismo funcionase se necesitarían temperaturas cercanas al cero absoluto. Otra hipótesis es que la quiralidad de la vida de nuestro planeta es debida a fenómenos semilocales comunes al conjunto de estrellas de la región cercana a nuestro Sol. En particular, se ha propuesto que una estrella pulsar en la vecindad del Sol fue fuente de radiación electromagnética quiral, polarizada circularmente, y que radiación ultravioleta quiral al interactuar con los procesos de síntesis destruyó selectivamente los compuestos de una de las quiralidades, dando lugar a compuestos con preferencia para la otra quiralidad.

Sin embargo, cálculos y experimentos muestran que la selectividad sería pequeña. Por otro lado, los aminoácidos pueden cambiar y alternar quiralidad cuando transcurre un tiempo largo, de modo que lo que llegaría a la Tierra sería material con una asimetría quiral muy pequeña.

EL MEDIO INTERESTELAR Y EL ORIGEN DE LA VIDA

Teniendo en cuenta lo anterior, hemos realizado investigaciones sobre qué procesos en el medio interestelar implicarían la formación de “piezas” prebióticas y protobióticas más elaboradas, de modo que al llegar a la Tierra el tiempo desde su llegada hasta tener protobacterias pudiese ser relativamente corto. También estamos analizando los procesos que en el medio interestelar permitirían la formación y llegada a la Tierra de material con quiralidad definida, en que esté presente casi una sola quiralidad.

Nuestro punto de partida es la presencia en el medio interestelar de granos de sílice cubiertos por material orgánico resinoso con surcos en la superficie. Los granos de sílice se formarían en la atmósfera de estrellas jóvenes de temperatura no muy alta y serían expelidos al espacio interestelar, cuya temperatura es alrededor de 100 K. Sobre estos granos se condensarían moléculas de agua, monóxido de carbono, bióxido de carbono y amoníaco, entre otras. Estas moléculas se ionizarían bajo la acción de radiación ultravioleta dando lugar a radicales libres que se combinarían entre sí sintetizando compuestos orgánicos y resina polimérica. Se tendrían granos con una cubierta resinosa y un centro de sílice. En el interior y en la superficie de estos granos se encontrarían moléculas orgánicas pequeñas, incluyendo aminoácidos. Experimentos en condiciones similares a las del medio interestelar han confirmado esta hipótesis (Berstein *et al.*, 2002; Muñoz Caro *et al.*, 2002). En estos experimentos se colocan granos de sílice en una atmósfera gaseosa con los compuestos mencionados anteriormente, a la temperatura del helio líquido, y se bombardea con radiación ultravioleta. Después de algún tiempo se suspende el experimento, viéndose que se han formado granos cubiertos con una resina polimérica ramificada y en la cual se encuentran compuestos orgánicos de molécula pequeña, incluyendo aminoácidos. Estos granos tienen una superficie irregular con surcos y canales. Estos granos son el punto de partida de nuestros modelos teóricos.

Hemos considerado un escenario en que suponemos que pasos importantes de la síntesis prebiótica tuvieron lugar en el medio interestelar y en cometas, y en que la dimensión del espacio de síntesis es tan pequeña como sea posible, de modo que la vida sería una necesidad y no cuestión de suerte. Los surcos y canales de la superficie de los granos interestelares serían dichos espacios reducidos. En nuestros modelos, procesos de polimerización molecular tienen lugar en los canales de la superficie de los granos interestelares, en lo que podríamos considerar un espacio casi unidimensional. En estos canales se adsorberían y evaporarían monómeros orgánicos, en general, de diferentes tipos. La radiación ultravioleta estelar ionizaría estos monómeros y radiación electromagnética de onda larga los haría oscilar en la superficie de los canales dando lugar a colisiones, a procesos de polimerización y a la formación de cadenas. Si en la superficie de estos canales hay partículas que interactúan con las cadenas de un modo no homogéneo, se puede presentar un movimiento sistemático en una dirección a lo largo del canal. En nuestros trabajos (Aldana *et al.*, 1998; Martínez-Mekler *et al.*, 1999; Aldana *et al.*, 2003a; Aldana *et*

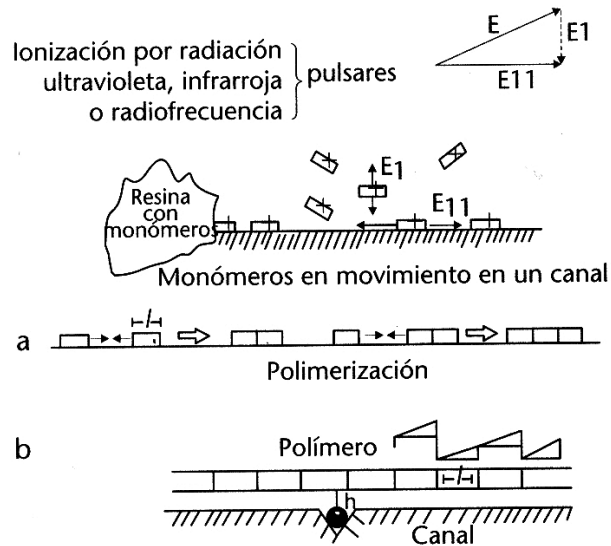


Figura 2

al., 2003b) hemos mostrado que bajo condiciones muy generales se tiene un desplazamiento no uniforme cada tres pasos (quizás relacionado con la presencia de tripletes en el código genético).

En la figura 2 se muestra un esquema del proceso hipotético de polimerización, en que los monómeros pierden electrones debido a la acción de la radiación ultravioleta y se transforman en radicales libres. Esto tendría lugar en la superficie de un canal o filamento en que se adsorberían los monómeros orgánicos presentes en el medio interestelar. Un movimiento oscilante puede tener lugar bajo el efecto del componente longitudinal del campo electromagnético y la geometría casi unidimensional reforzaría considerablemente la probabilidad de colisión de los radicales libres, favoreciendo su polimerización.

En la figura 3 se muestra un polímero formado de monómeros, con una distribución asimétrica de carga, que se desplazan respecto a un objeto fijo representado por una esfera.

Tenemos, pues, que en el medio interestelar pudieron tener lugar procesos de polimerización y transporte. Se puede mostrar que para polímeros complementarios se tiene una mayor eficiencia de transporte y que bajo ciertas condiciones, en canales que se bifurcan se podrían tener procesos de replicación (Cocho *et al.*, 2003). Aunque en lo anterior hay un componente especulativo, se tiene la posibilidad de procesos protobióticos en el medio interestelar y cabe preguntarse si esto implicaría la presencia de vida de algún tipo en dicho medio.

En lo anterior se ha propuesto la presencia de polímeros polares o quirales. Como se mencionó anteriormente, los polímeros biológicos de nuestro planeta tienen quiralidad definida, los aminoácidos son levógiros y la desoxirribosa del ADN es

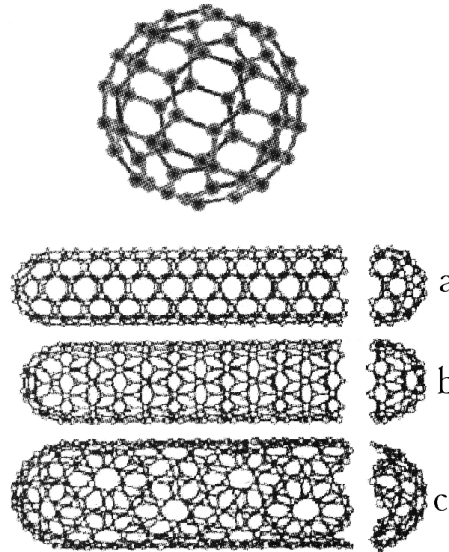


Figura 3

dextrógira. Se puede “probar” que estas quiralidades definidas se originaron antes de las síntesis bióticas, probablemente en el medio interestelar.

Cronin y Pizzarello (1997) han analizado meteoritos y han encontrado que hay una pequeña preferencia de los aminoácidos levógiros. La diferencia en las quiralidades iniciales pudo ser mucho mayor, y ésta puede haber disminuido debido al proceso de racemización asociado al efecto túnel cuántico.

Como mencionamos anteriormente, se ha propuesto un mecanismo “semilocal”, común a un conjunto de estrellas vecinas a nuestro Sol. Bonner (1991) ha propuesto un mecanismo de este tipo en que pulsares emitirían radiación ultravioleta polarizada circularmente. Esta radiación destruiría preferentemente compuestos de una de las quiralidades y algunos de estos compuestos podrían ser aminoácidos. En experimentos en que se han repetido las condiciones del medio interestelar, se ha encontrado resina polimérica y aminoácidos. Sin embargo, con tiempos largos estos aminoácidos cambian de quiralidad y se tendría una mezcla racémica o casi racémica. Esta mezcla casi racémica es la que llegaría a la Tierra.

Cabe preguntarse si asociado a los campos magnéticos y radiación polarizada se pueden formar en las atmósferas de las estrellas o en el medio interestelar compuestos o estructuras quirales que resistan el proceso de racemización.

Entre los compuestos del carbono que hay en el medio interestelar (véase la figura 3) se tienen fullerenos (en forma de balón de fútbol) y nanotubos (Ehrenfreund y Charnley, 2000). Existen varias formas de estos últimos, dos de ellas no quirales y otras dos, una levógira y otra dextrógira.

Se cree que estos nanotubos se formaron en las atmósferas estelares. En esas

estrellas puede haber campos magnéticos muy fuertes y radiación electromagnética de diversas frecuencias, y bajo tales condiciones pudieron formarse nanotubos de una sola quiralidad. Estos nanotubos quirales pasarían al medio interestelar, a cometas, a meteoritos y a la Tierra. Vale la pena señalar que se han encontrado fullerenos y nanotubos en meteoritos con gases nobles en su interior, lo que se supone implica que vienen del medio interestelar (Botta y Bada, 2002).

Se puede poner a prueba esta hipótesis viendo si en los nanotubos que se han encontrado en estos meteoritos domina una de las quiralidades. De ser así, esto ayudaría a entender el origen de la quiralidad de los polímeros biológicos en nuestro planeta. Luego, habría que ver cómo se “transmite” la quiralidad de los nanotubos a los polímeros biológicos.

Como comentario final, podríamos decir que la “conexión celeste” explicaría algunas de las incógnitas básicas del problema del origen de la vida. Estamos organizando un grupo de trabajo que trataría de contestar las preguntas físicas, químicas y biológicas que plantea el escenario anterior.

COMENTARIOS FINALES

En virtud de lo anterior, pudieran haber llegado a la Tierra nanotubos quirales empotrados en canales de la superficie de granos cometarios (véase la figura 4). Estos nanotubos serían la base de máquinas moleculares de las que se derivarían eventualmente las máquinas moleculares asociadas a los procesos de replicación genética y síntesis de proteínas. Estas máquinas moleculares tienen dimensiones moleculares y, debido a su pequeño tamaño, las fluctuaciones térmicas son importantes. De hecho, procesos fundamentales de la dinámica celular como son la replicación y transcripción del ADN, la síntesis de proteínas en el ribosoma, la contracción muscular y el paso de iones a través de la membrana celular se deben a máquinas moleculares.

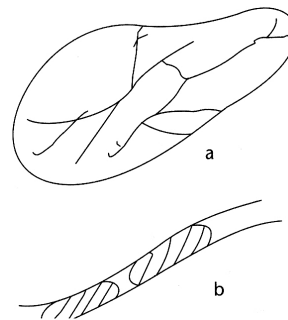


Figura 4

En México existe un grupo importante de investigadores que trabajan en la problemática del origen de la vida. En particular, algunos investigadores estamos interesados en la “conexión interestelar”.

Aparte de ayudar a responder algunas de las incógnitas del origen de la vida en la Tierra, estas investigaciones podrían tener implicaciones tecnológicas, tales como la fabricación de nanotubos con quiralidad definida. Los nanotubos quirales podrían ser la base de autocatálisis asimétrica, con importancia tecnológica, y se podría estudiar e intentar su formación en presencia de campos magnéticos y radiación electromagnética polarizada.

BIBLIOGRAFÍA

- Aldana, M., F. Cázarez-Bush, G. Cocho y G. Martínez-Mekler (1998), "Primordial synthesis machines and the origin of the genetic code", *Physica A*, vol. 257, pp. 119–127.
- Aldana, M., G. Cocho, H. Larralde y G. Martínez-Mekler (2003a), "Translocation properties of primitive molecular machines and their relevance to the structure of the genetic code", *Journal of Theoretical Biology*, vol. 220, pp. 27–45.
- Aldana, M., G. Cocho, H. Larralde y G. Martínez-Mekler (2003b), "Polymer transport in random potentials and the genetic code: The waltz of life", *Annales Henri Poincaré*, vol. 4, pp. 5459–5474.
- Berstein, M. P., I. P. Dworkin, S. A. Sanford, G. W. Cooper y L. J. Allamandola (2002), "Racemic amino acids from the ultraviolet photolysis of interstellar ice analogues", *Nature*, vol. 416, pp. 401–403.
- Bonner, W. A. (1991), "The origin and amplification of biomolecular chirality", *Origin of Life and Evolution of the Biosphere*, vol. 1, pp. 59–68.
- Botta, O., y J. L. Bada (2002), "Extraterrestrial organic compounds in meteorites". *Surveys in Geophysics*, 23(5), 411–467.
- Cocho, G., A. Cruz, G. Martínez-Mekler y R. Salgado-García (2003), "Replication ratchets: Polymer transport enhanced by complementarity", *Physica A*, vol. 327, pp. 151–156.
- Cronin, J. y S. Pizzarello (1997), "Enantiomeric excesses in meteoritic amino acids", *Science*, vol. 275, pp. 951–955.
- Ehrenfreund, P. y S. B. Charnley (2000), "Organic molecules in the interstellar medium, comets and meteorites", *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 38, pp. 427–483.
- Kissel, I. y E. R. Krueger (1997), "Organic Chemistry in comets from remote and in situ observations", en P. J. Thomas, C. F. Chyba y C. P. McKay (eds.), *Comets and the origin and evolution of life*, Springer-Verlag, Nueva York, pp. 69–109.
- Martínez-Mekler, G., M. Aldana, F. Cázarez-Bush, R. García-Pelayo y G. Cocho (1999), "Primitive molecular machine scenario for the origin of the three base codon composition", *Origin of Life and Evolution of the Biosphere*, vol. 29, pp. 203–214.
- Muñoz Caro, A. *et al.* (2002), "Amino acids from ultraviolet radiation of interstellar analogues", *Nature*, vol. 416, pp. 403–406.

⊙ *Esta es una página en blanco.* ⊙

LA CIENCIA Y SUS DEMONIOS *

*Si pretendes desdeñar la razón y la ciencia,
los mayores logros humanos,
y te abandonas al espíritu de la mentira
mediante el embuste y la hechicería;
entonces, ya te tengo.*

(Mefistófeles dirigiéndose a Fausto)

JOHANN WOLFGANG GOETHE, *Fausto*

BORGES en *Pierre Menard, autor de El Quijote* escribe: “la verdad, cuya madre es la historia, émula del tiempo, depósito de las acciones, testigo de lo pasado, ejemplo y aviso de lo presente, advertencia de lo por venir”. La historia es mucho más que la narrativa secuencial de eventos y personajes que nos enseñan en la escuela. Al ser la madre de la “verdad”, se vuelve indispensable para obtener conocimiento, y si aceptamos que uno de los papeles de la ciencia es precisamente ese aprendizaje, entonces la tarea científica pasa obligadamente por el estudio y la comprensión de los hechos históricos.

La idea de concebir a la historia como una serie de procesos sujetos a causas y efectos es parte del legado que nos ha dejado la monumental obra de Karl Marx y Friedrich Engels. Una de las frases más ilustrativas al respecto, fue escrita por Marx en 1852, en *El dieciocho Brumario de Luis Bonaparte*, y ha sido citada en múltiples ocasiones por la literatura política: “Hegel dice en alguna parte que todos los grandes hechos y personajes de la historia universal aparecen dos veces. Pero se olvidó añadir: la primera vez como tragedia, la otra como farsa”.

Marx establece un paralelismo entre el golpe de estado que le permitió a Louis Napoleón Bonaparte convertirse en emperador de Francia bajo el nombre de Napoleón III, y una asonada semejante que le permitió a su tío –Napoleón Bonaparte– alcanzar el trono de la misma nación unas décadas antes, en las postrimerías de la Revolución Francesa. Marx atribuye a Hegel la afirmación de que la historia tiene un carácter cíclico. Evidentemente, ninguna persona puede aceptar una periodicidad estricta en la historia; si así fuera, estaríamos condenados a observar el desenvolvimiento de un drama totalmente determinista y predestinado. Por eso, Marx emplea una metáfora para subrayar que en la historia se pueden reconocer hechos

* Ensayo escrito por Pedro Miramontes y Germinal Cocho. Publicado en la revista *Ciencias* núm. 66, junio de 2002, pp.77-85.

específicos aparentemente repetitivos (“la primera como tragedia, la otra como farsa”), pues tienen rasgos que podrían parecer semejantes, pero cuyas circunstancias particulares son diferentes.

Los historiadores de la ciencia han identificado desde hace tiempo un vaivén, una aparente periodicidad, es decir, una alternancia entre el racionalismo y el romanticismo. Esta pugna, abierta o soterrada, ha dominado el desarrollo de la ciencia prácticamente desde sus orígenes. En estos momentos la ciencia refleja la crisis de la sociedad occidental, lo cual indica que estamos entrando en una de las transiciones del antagonismo mencionado. Si bien los tiempos de crisis son tiempos de riesgo y peligro, también lo son de oportunidad para las ideas innovadoras y para los cambios revolucionarios.

LA *Naturphilosophie*

En las sociedades occidentales –americanas y europeas–, en los albores del siglo XIX, surgió un importante movimiento, tanto en el arte como en la ciencia, de pensadores que no encontraban satisfacción a sus inquietudes sociales y éticas en la atmósfera de estricto clasicismo, dominante en el mundo intelectual de la época. Frente al frío racionalismo ilustrado que imperaba, esta corriente surgió como un movimiento de exaltación del hombre, de la naturaleza y de la belleza, pero también como expresión social de rebeldía, libertad e independencia. Se buscaba, consciente o inconscientemente, una salida que privilegiara al individuo, al “yo” sobre la colectividad. A este anhelo utópico de persecución por un mundo ideal, sin más base que la voluntad o el fervor, a la búsqueda de soluciones fundadas en los sentimientos por encima de la razón, se le llama romanticismo.

El romanticismo europeo enfatiza lo individual por encima de lo colectivo, y es una reacción contra las leyes del arte neoclásico, en el cual la creatividad se encontraba restringida por reglas académicas, por tanto, es la expresión directa de las emociones que a menudo busca sus fuentes en el pasado o en las mitologías.

En las ciencias, el romanticismo postula que la naturaleza no puede ser explicada racionalmente y que sólo es posible percibirla de manera intuitiva. Por lo cual, no hay una descripción única del universo pues ésta depende del individuo, de su entorno y sus circunstancias; lo subjetivo, irracional e imaginativo se abren paso. Los filósofos Fichte y Schelling le dieron sustento a esta forma de pensamiento bajo el nombre de *Naturphilosophie*.

Ésta se opone radicalmente a la tradición empírico-matemática de los siglos anteriores y, sobre todo, a la corriente racionalista que dominaba desde el Siglo de las Luces, conocida como la Ilustración. Los racionalistas, fuertemente influidos por el éxito de la mecánica de Newton, pensaban que el mundo se podía entender y explicar completamente con base en estas leyes. En 1705 Edmund Halley predijo que el cometa que ahora lleva su nombre, y que había pasado cerca de la Tierra en el sistema solar en 1607 y 1682, regresaría en 1758. La exactitud de su predicción produjo entusiasmo y suscitó gran confianza en el poder de los métodos matemáticos para ir más allá en la descripción del universo, con lo cual se abrió la posibilidad

de predecir el futuro. La naturaleza se percibía de pronto como un libro abierto, dispuesta a revelar sus secretos a quien conociese su lenguaje: las matemáticas, según Galileo.

La base del racionalismo era la confianza en el poder ilimitado de la razón. Este era el medio que los humanos debían usar como único instrumento para acceder a la verdad, a la comprensión del universo y a la búsqueda de su propia felicidad. Ellos seguían un método analítico como estrategia de estudio, que les llevaba a descomponer a la naturaleza en partes. Además buscaban afanosamente la descripción detallada de la misma, un buen ejemplo es la clasificación de los seres vivos por Carl Linne en un sistema que siguiese, en sus palabras, “el orden dictado por su naturaleza”.

OTRA OSCILACIÓN DEL PÉNDULO

A finales del siglo XIX y comienzos del XX hubo otra alternancia en la lucha sentimiento-razón. Al romanticismo le siguieron varios movimientos filosóficos apegados al racionalismo, tanto en las ciencias como en las artes, entre los cuales se encuentra “el realismo”, que tuvo muchos seguidores en Francia, cuna de los enciclopedistas ilustrados. En las artes, como su nombre lo indica, tiende a dibujar un retrato exacto de la naturaleza y la sociedad. El ejemplo paradigmático es *La comedia humana*, de Honoré de Balzac, retrato ambicioso y erudito de la sociedad con sus pasiones, virtudes y defectos.

En el fondo los choques entre las corrientes que estamos señalando forman parte de una pugna más antigua y todavía presente. Desde que los humanos aprendieron a cuestionarse y a interrogar a la naturaleza, existe el antagonismo “idealismo” versus “materialismo”. También estos términos son confusos, pues comúnmente el idealismo tiene una connotación positiva que se refiere a la capacidad de los individuos para desenvolverse y actuar durante la vida, guiados por principios morales muy elevados. Sin embargo, lo que caracteriza al idealismo filosófico es que sus partidarios opinan que el mundo y sus fenómenos no tienen una existencia propia e independiente del observador y, por tanto, no existe una realidad objetiva externa al individuo e independiente de su conciencia.

Por otra parte, en el lenguaje cotidiano, alguien es “materialista” cuando muestra un exagerado interés por las posesiones mundanas y el dinero. Sin embargo, el materialismo filosófico considera que el universo y la naturaleza tienen una existencia objetiva, aunque no estemos presentes. Es decir, que la razón del perímetro de una circunferencia con su radio es $3.141592\dots$ aun si no hubiese habido matemático que lo formulase y que un árbol hace ruido al caer en la mitad del bosque, a pesar de que nadie lo escuche.

Durante la influencia del nuevo racionalismo vuelve la confianza de que la ciencia tiene la capacidad de explicar todos los fenómenos naturales e incluso los sociales. Más aún, que estos son parte de la física y que como tales deben ser estudiados. En la actualidad no todos los biólogos teóricos –en su mayoría físicos– están convencidos de que la teoría de Darwin de la evolución biológica por selec-

ción natural sea la explicación del fenómeno evolutivo, aunque a finales del siglo XIX el darwinismo encajaba perfectamente bien, lo mismo que el marxismo en el racionalismo materialista. El neorromanticismo del siglo XIX no es igual al precedente, ya que, por un lado, había sido influido por el realismo y, por el otro, la historia no es una mera repetición, como se mencionó con anterioridad. Éste tiene sus consecuencias graves, pues su naturaleza es más negativa y su rechazo al racionalismo es más violento.

En 1918, año en que termina la Primera Guerra Mundial, Oswald Spengler (filósofo alemán) publica *La decadencia de Occidente*. El argumento central del libro es que las civilizaciones, al igual que los organismos, nacen, crecen, maduran y terminan en una degradación irreversible. Spengler opina que la cultura occidental agotó su fase creativa, situándose en una etapa cercana a la muerte intelectual. Este proceso se debía, en buena parte, a la preponderancia del materialismo sobre las formas espirituales, por lo cual afirma que el racionalismo y la ciencia son culpables de esta degradación espiritual (“Tras dos siglos de orgías científicas, hemos llegado a hartarnos”). Spengler inicia una línea de pensamiento con gran influencia en algunas corrientes contemporáneas que descalifican a la ciencia, e inician una cruzada en contra de lo que llaman “verdades absolutas”. Otra frase muy ilustrativa del mismo autor es: “La naturaleza es siempre una función de la cultura”, en ella no dice que la ciencia es función de la cultura (lo que sería aceptable), sino de la naturaleza, es decir, que ésta no tiene existencia propia en ausencia de los humanos.

Si bien las artes y las ciencias encontraron un ambiente de notable crecimiento durante la República de Weimar, la inestabilidad política y la gran crisis económica provocaron en el ciudadano medio un sentimiento de desesperanza y miedo ante un futuro incierto, lo que genera la necesidad de buscar culpables, ya sean reales o ficticios, así como de buscar salidas oblicuas para poder fincar alguna esperanza, no importando si ésta carece de bases. Es en este ambiente donde renacen las supersticiones y los mitos, así como los charlatanes que los explotan, con consecuencias nefastas. Adolf Hitler y Hermann Goering habían intentado una asonada en Munich en 1924, pero más tarde se convencieron de que redituaba más, políticamente hablando, culpar a los judíos de la precaria situación económica, revivir los mitos de un pasado germánico grandioso y convencer a las masas pobres e incultas de que cada uno de ellos era un superhombre en potencia, con un futuro esplendoroso si se les daba la oportunidad. Finalmente, la República de Weimar muere con el ascenso al poder del Partido Nazi en 1933.

EL MUNDO HOY

Los profundos cambios que el mundo experimentó en la última década del siglo XX y que estuvieron asociados con la caída de la Unión Soviética y el fin del llamado “bloque socialista”, condujeron al apoderamiento mundial de la escena política y económica por parte de Estados Unidos y su capitalismo neoliberal.

Analistas, comunicadores y personajes de la política occidental se congratularon con este cambio y auguraron un futuro de felicidad sin precedentes, en el cual la humanidad compartiría los valores estadounidenses de libertad, moral y democracia. Cabe mencionar que este escenario idílico se vino abajo antes de que lo hicieran las torres gemelas de Nueva York. No hace falta ser sabio para percibir que no todo el mundo quiere una homogeneización impuesta por la fuerza, ya que la “globalización” no significa que todos los pueblos de la Tierra tomen lo mejor de los demás y puedan incorporarlo a su estilo de vida en un intercambio fructífero y enriquecedor; más bien es la aceptación, sin posibilidad de apelación, de los estándares y valores estadounidenses. El rechazo a la imposición homogeneizante que se demuestra con el auge mundial de los movimientos globalifóbicos, es a la “McDonalización” de la economía, de las costumbres y los valores (incluso gastronómicos).

El tránsito del mundo bipolar al unipolar, lejos de aliviar las tensiones que se generaron en la *guerra fría*, ha traído consigo aberraciones en las relaciones entre naciones, sociedades e individuos. El mundo se encuentra inmerso en una crisis generalizada, con múltiples facetas, que se reconoce por las siguientes manifestaciones: la guerra, el método insensatamente elegido para resolver conflictos entre estados, naciones o grupos étnicos; el terrorismo, que implica tanto la acción desesperada de grupos minoritarios como el abuso ilegal del Estado que tiene el poder suficiente para ejercerlo de manera impune; el desorden económico global que hace recaer el bienestar de una reducida clase acaudalada en los hombros de una mayoría.

El mundo está dividido en dos partes; una está excluida de cualquier beneficio del desarrollo, desprovista de las condiciones que permiten una vida humana con un mínimo de dignidad. En esa parte se concentran los países del llamado Tercer Mundo.

La desesperanza conduce a la pérdida de fe en el progreso, a la búsqueda de soluciones personales inmediatas, por lo cual la mayoría se vuelca al misticismo, cae en los brazos de la religión, tradicional o emergente y ante la privatización de los servicios de salud que los vuelve inaccesibles al pueblo, confía su salud a prácticas pseudocientíficas, cuando no charlatanescas.

En una situación análoga a lo mencionado con anterioridad, y semejante a la atmósfera de la República de Weimar, el cuadro aquí descrito orilla a la gente a la búsqueda y persecución de culpables, sean estos reales o figurados: estamos en otra transición del racionalismo al romanticismo. Esta vez se acusa, quizá con razón, a la ciencia de ser parte del aparato de desigualdad e injusticia.

LOS DEMONIOS DE LA CIENCIA

En la alternancia del racionalismo y el romanticismo, actualmente, el primero está en el banquillo de los acusados. Un poeta, más notable por su actuación política (presidente de Checoslovaquia desde 1989 y posteriormente de la República Checa) expresa su punto de vista de la siguiente manera:

La caída del comunismo se puede interpretar como una señal de que el pensamiento moderno –basado en la premisa de que el mundo es discernible objetivamente y que el conocimiento así adquirido es susceptible de generalización– ha caído en una crisis final.

Esta frase de Václav Havel¹ describe a lo que pretendemos llegar: la crisis de valores no solamente genera una pérdida de confianza en la racionalidad, sino que además produce confusión entre los intelectuales, conduce a errores metodológicos como el de Havel, al confundir el marxismo con la burocracia soviética, y al grosero disparate de concluir, bajo esta premisa falsa, que el mundo no es discernible objetivamente.

Estas ideas encuentran eco hoy en día en las escuelas del posmodernismo y del relativismo cultural. El punto de vista de que los valores de una cultura no son bienes absolutos, sino que dependen del desarrollo histórico de cada cultura (doctrina conocida como relativismo cultural) es innegable desde la perspectiva de la antropología (los principios morales pueden ser distintos en diferentes culturas sin que se pueda decidir cuál es el bueno y cuál el malo; los sacrificios humanos en la antigua Tenochtitlan horrorizaron a los españoles que, en cambio, veían muy natural que algunas personas muriesen en la hoguera). Sin embargo, extrapolar esta idea hasta la afirmación de que los resultados de la ciencia dependen también del marco de referencia de cada cultura, lo más que puede producir es una sonrisa.

Nosotros pensamos que el universo se puede discernir objetivamente y que el conocimiento así adquirido es susceptible de generalización, pero no podemos cerrar los ojos ante la diversidad de críticas y ataques a la ciencia que son legítimas y tienen fundamentos reales. La ciencia ha estado del lado de los intereses más perversos y carga consigo pecados y demonios que es necesario exorcizar.

Entre estos demonios, se encuentra la relación de la ciencia con la tecnología guerrera. Pablo González Casanova dice que:²

tenemos que pensar que la globalización está piloteada por un complejo empresarial-financiero-tecnocientífico-político y militar que ha alcanzado altos niveles de eficiencia en la estructuración, articulación y organización de las partes que integran al complejo, muchas de las cuales son empresas o instituciones estatales también complejas. Así, el megacomplejo dominante, o el complejo de complejos dominante, posee grandes empresas que disponen de bancos para su financiamiento, de centros de investigación científica para sus tecnologías, de casas de publicidad para difundir las virtudes de sus productos, de políticos y militares para la apertura y ampliación de sus “mercados de insumos”, o de sus mercados de realización y venta, o de sus mercados de contratación de trabajadores calificados y no calificados.

La asociación de los científicos con la guerra no es nueva; ya el notable Arquímedes de Siracusa en el siglo III a. C. inventaba máquinas de combate durante la guerra de su ciudad natal contra los romanos. A partir de entonces, se vuelve

¹ Havel fue presidente de la República Checa hasta el 2003.

² González Casanova, P., 2004. *Las nuevas ciencias y las humanidades: de la academia a la política*. Editorial Anthropos.

muy difícil encontrar algún instrumento de muerte que no dependa de un desarrollo tecnológico basado en trabajos científicos. De hecho, si aceptamos que la tecnología es ciencia aplicada, entonces quizá se pueda afirmar que todos los instrumentos de exterminio modernos son “hijos” de la ciencia.

Como lo menciona González Casanova, la ciencia forma parte de un complejo empresarial-financiero-tecnocientífico-político y militar. Este hecho restringe severamente la capacidad científica de decidir las líneas de investigación, pues el financiamiento proveniente de este complejo no se ocupa de la ciencia como deleite intelectual ni como medio para atender los problemas de las mayorías, sino que forma parte del aparato de dominación. En el mundo globalizado y dominado por el neoliberalismo los estados han ido dejando, paulatinamente, de ser la fuente principal de financiamiento de la actividad científica. Las pautas de investigación biotecnológica, biomédica, de la ciencia de materiales, informática y de muchas otras áreas obedecen a los intereses de grandes compañías que, a su vez, cumplen el interés de la ganancia inmediata.

Aun si fuésemos lo suficientemente indulgentes para pasar por alto la asociación de la ciencia con los medios bélicos, existen también aspectos negativos en el terreno de la ética. La imagen quijotesca que la sociedad tiene del científico como individuo distraído de su entorno, habitante del mundo de los sueños y embebido en su trabajo, a menudo propalada por los mismos científicos como para rehuir de su responsabilidad, es simple y llanamente falsa. Los científicos, siendo gente educada, con una formación académica de muchos años, estarían en condiciones, si no obligados, de saber qué es lo que sucede en su entorno. Bajo estas circunstancias es difícil encontrar una explicación acerca de la razón por la cual no existe más que un puñado de ellos que levanta su voz contra las complicidades señaladas y contra el desinterés por nuestro planeta y por los pobres del mismo.

Si bien es cierto que la ciencia ha generado un bienestar material en la humanidad (o mejor dicho, en parte de la humanidad) también ha dejado de lado la moral y la ética. Es decir, que no se ha preocupado por buscar respuestas satisfactorias a las preguntas de la gente acerca del sentido, valor y propósito de la vida. La ciencia se ha convertido en una religión secular con “verdades” reveladas a los mortales sólo a través de sacerdotes, dueños exclusivos del saber universal: la ciencia es la base de la tecnología moderna y ésta lo es del capitalismo actual.

ASOMBRO Y ESCEPTICISMO

¿Cómo debería ser entonces la ciencia? Vayamos a sus fundamentos, a ese núcleo aún no contaminado y que eventualmente permitirá el rescate de su fondo ético.

La ciencia consta de varios elementos; podemos decir que quizá, someramente, los más importantes sean el asombro y el escepticismo. Lo primero nos lleva a maravillarnos ante el universo y a preguntarnos acerca de su origen, desarrollo y evolución. Este elemento también lo tienen las religiones; vivir en “el temor a Dios” se entiende actualmente de manera errónea como el miedo constante y continuo a la deidad. El uso de “temor” en esta expresión debe tomarse como sinónimo de so-

brecogimiento, pasmo o asombro (como en la frase inglesa *awe of God* o en alemán *Ehrfurcht vor Gott*). Sin embargo, a diferencia de las religiones, la ciencia tiene un interés exclusivo por el mundo físico y sus manifestaciones, y deja la espiritualidad al albedrío personal. Lo segundo es el ingrediente que distingue a la ciencia de las religiones.

El escepticismo implica una actitud crítica ante los hechos y fenómenos, ya sean naturales o sociales. En la ciencia las teorías y explicaciones no se aceptan sin discusión y convencimiento, no se admiten las explicaciones del tipo “porque sí” o “porque Dios quiere”. Por ello, un científico debe ser parte de la conciencia de la sociedad (empezando por su gremio), debe tener un compromiso con su gente y luchar por desterrar las supersticiones y la charlatanería. En los medios de comunicación impresos y electrónicos, son escasos los espacios dedicados a la ciencia y abundan los que de una manera u otra fomentan prejuicios, estereotipos, pseudociencias y supersticiones. Detrás de todo esto se encuentra una poderosa industria que logra enormes ganancias explotando la credibilidad y buena fe de la gente. La astrología, el pensamiento *new age* y las religiones modernas representan negocios formidables, que quebrarían inmediatamente si la educación fomentara con éxito una actitud de escepticismo entre los ciudadanos.

No podemos engañarnos con la pretensión ingenua de que con la pura voluntad podemos cambiar una estructura con intereses políticos y económicos colosales. Sin embargo, quedarse sin hacer algo es convalidar la situación.

La educación es un campo en donde se forma el espíritu, lo cual repercute en la sociedad, por lo que es un espacio en donde se puede actuar para cambiar el estado de las cosas y que puede llevar a fundar una corriente de opinión y trabajo que sea propositiva y, más aún, cuyas propuestas convengan a la gente. En nuestro caso especial el énfasis estaría situado en la educación superior.

INTERROGANTES

Existe una buena cantidad de estudios y diagnósticos acerca de los problemas de la educación superior en México, en los cuales se han formulado una serie de preguntas, entre las que destacan las siguientes:

¿Diversidad u homogeneidad? La educación superior pública se encuentra desde hace tiempo bajo presiones para uniformar planes de estudio y para aplicar métodos homogeneizantes de evaluación tanto de estudiantes como de profesores. Un ejemplo son los exámenes departamentales y las evaluaciones a los docentes para la asignación de sobresueldos.

Resulta curioso que esta tendencia cobre fuerza incluso en sectores académicos, cuando los avances científicos recientes apuntan en dirección contraria. La física y la matemática de los sistemas complejos muestran que la diversidad ayuda a que los sistemas incrementen su capacidad de adaptación ante situaciones novedosas. Los planes de estudio y los programas de materias rígidos no dejan campo de maniobra para la diversidad y son la garantía de problemas futuros. En la Facultad de Ciencias de la UNAM, la mitad de las materias de la carrera de matemáticas

son optativas; los estudiantes pueden elegir de un conjunto bastante amplio y de esa manera decidir de manera flexible su formación profesional. Adicionalmente, cada profesor elige el enfoque y la orientación que le dará a sus materias. El resultado es que esta facultad produce matemáticos muy diversos y todos ellos con grandes posibilidades de éxito al insertarse en el mercado laboral o en el mundo académico. Este caso muestra un ejemplo contundente de que se puede enfrentar a la política de uniformación seguida por las autoridades educativas de México. Hay que defender la libertad de cátedra y pugnar por que no se implante nada parecido a exámenes departamentales. La homogeneización de las personas y de las actividades humanas es característica de los regímenes totalitarios.

¿Élite o masas? También hay que responder con firmeza a la tendencia en boga de dificultar el ingreso y la permanencia de estudiantes que por restricciones personales o, la mayoría de las veces, por su nivel socioeconómico, no pueden ser estudiantes de tiempo completo o tener el mismo rendimiento que otros; hay que convencerlos de que un estudiante que no termina una carrera es útil a la sociedad y no es una "inversión desperdiciada"; aquél que abandona los estudios a la mitad de la carrera, eleva el nivel promedio de la cultura de la sociedad y esto es favorable. Mejor todavía sería que ese individuo pudiera retomar sus estudios cuando su situación se lo permitiera.

Rechazamos pues el absolutismo de las dicotomías, así como nos resulta aberrante la intimidación "están con los Estados Unidos o con los terroristas" recientemente proferida por George W. Bush, al igual que estamos en contra de ser obligados a elegir entre los extremos: "educación elitista con calidad" *versus* "educación masiva mediocre". ¿Quién puede decir que tiene la demostración fehaciente de que no es posible tener una educación masiva con calidad? Normalmente, frases como las entrecomilladas representan lugares comunes que, a fuerza de repetición, terminan siendo aceptadas sin reserva; y es insólito que los científicos, que casi por definición no deberían aceptar afirmaciones contundentes sin evidencia que las sostenga, de buena gana se traguen mitos, como el propalado por un "líder" académico,³ quien afirma que con la edad "decrece la capacidad de los profesores para generar nuevos conocimientos" y que "un profesor de arriba de 60 años (sic) no puede competir en productividad con los profesores jóvenes". Alguien alguna vez dijo que una mentira repetida mil veces se vuelve verdad.

¿Especialización o generalización?, ¿universidad pública o universidad privada? La especialización prematura de los estudiantes desemboca en la formación de profesionales con un elevado grado de competencia, pero en campos cada vez más restringidos, lo cual provoca el aislamiento de los científicos. La comunicación, ya no digamos entre físicos y biólogos, por mencionar alguna, sino entre biólogos de diferentes especialidades ya es casi imposible: un ecólogo de campo y un genetista molecular pueden afrontar dificultades para encontrar un tema común de conversación científica. La superespecialización profesional tiene su análogo en la evolución biológica; a todos nos han enseñado que un organismo muy especializa-

³ Luis Mier y Terán Casanueva, rector general de la Universidad Autónoma Metropolitana en el 2002; entrevista en *La Jornada* del 26 de noviembre de 2001.

do puede ser muy eficiente en la explotación de su entorno, pero extremadamente frágil ante cambios del mismo. El oso hormiguero tiene una anatomía muy adecuada para la búsqueda, caza e ingestión de hormigas únicamente, pero ¿qué pasa si las hormigas se acaban? A un profesionalista superespecializado también se le pueden acabar las hormigas.

Un egresado de una universidad pública y uno de una privada son, evidentemente, distintos en muchos aspectos. Uno de ellos es la incuestionable diferencia salarial que obtendrán al salir. Esto no es reflejo de la calidad de la educación que recibieron o de la cultura adquirida (como lo muestra el caso del gerente⁴ de México S. A.), sino de lo útiles que serán al aparato productivo. Hasta ahora, los empresarios mexicanos han preferido a un profesionalista bien capacitado para resolver tareas específicas y puntuales. Nosotros tenemos que convencer a los empleadores (públicos o privados) que les resulta más redituable alguien con capacidad para adecuarse exitosamente a un entorno rápidamente cambiante. Es decir, debemos persuadirlos de que conviene más mantener en su empleo a alguien adaptable a situaciones novedosas que remplazar a una persona superespecializada cuando sus habilidades dejan de ser útiles y traer a alguien nuevo, con todo el problema que representa iniciarlo en las labores de un centro de trabajo. En pocas palabras, creemos que la universidad pública debe preparar “milusos” de alto nivel, en lugar de especialistas con una visión reducida.

¿Cómo incorporar el conocimiento moderno a la enseñanza? Nuestros planes de estudios continúan con la idea de presentar un desarrollo compartimentalizado de la ciencia. Esto ha sido bueno hasta ahora para la formación “intelectual” del estudiante, pero ¿será adecuado en un mundo en rápido cambio? Existe una tendencia moderna a borrar las fronteras artificiales entre las ciencias, lo cual se aprecia con la emergencia de disciplinas como la biología matemática, la bioinformática y la física biológica. Siguiendo nuestra tendencia, la propuesta sería, por poner un ejemplo, presentar la física a la luz de la biología y la biología a la luz de la física. En ningún lugar se ha analizado qué repercusiones tendría esto en los planes y programas de estudio, ¿un tronco común?, ¿módulos polivalentes?

En pocas palabras, ¿cuál sería el mejor camino para llevar a los estudiantes a un trabajo productivo temprano rompiendo así la estratificación social en la ciencia con sus mandarines y siervos? No lo sabemos, posiblemente, grupos relativamente pequeños de profesores que impartan materias en los primeros semestres pudieran ponerse de acuerdo acerca de cómo lograr que los estudiantes, independientemente de sus carreras, conozcan desde muy temprano cuáles son las polémicas contemporáneas en la ciencia; y se enfrenten así a una serie amplia de lecturas generales que los lleven a una dinámica autosostenida de estudio para la adquisición de herramientas para el pensamiento. En otras palabras, romper con la obtención pasiva de conocimiento como un “bagaje inerte” y convencer al estudiante de que el mundo se ve diferente (mucho más lindo) si se saben desentrañar las sutilezas del razonamiento por analogía, descubrir la utilidad del formalismo y aprender a dejar suelta la fantasía acerca de los aspectos metafísicos y filosóficos de la ciencia.

⁴ En el 2002 era Vicente Fox.

COLOFÓN

En las épocas de crisis afloran las mentes lúcidas y valerosas. En la transición del racionalismo al romanticismo, en los albores del siglo XIX, existió un grupo de pensadores que se llamaron a sí mismos los morfólogos racionalistas. Goethe, D'Aubenton, Geoffroy Saint-Hilaire y Lamarck son algunos de los nombres asociados con esta escuela. A finales del mismo siglo, y en medio de otra época más de transición, aparece la enorme personalidad de D'Arcy Wentworth Thompson. Todos estos naturalistas, montados a caballo entre el final de una etapa de racionalismo y el comienzo de una de romanticismo, sintetizaron lo mejor de ambos mundos: la pasión por el estudio detallado, minucioso y reductivo, propio de los racionalistas, y el amor de los románticos por los principios generales.

Todos ellos, ahora desdeñados por el *establishment* científico, fueron seres creativos, a la vez racionales y emotivos, que dentro de las restricciones sociales llegaron a ser artífices de su propia vida y dueños de su destino. Esto en contraste chocante con la situación neoliberal presente, en la que todos los aspectos de la vida humana para ser considerados de valía, tienen que representar ganancia o beneficio capitalista, y en la cual el hombre no es más que el medio que tienen las mercancías para producir más mercancías.

⊙ *Esta es una página en blanco.* ⊙

LA EVOLUCIÓN BIOLÓGICA DESDE LA PERSPECTIVA DE LA COMPLEJIDAD *

*We are not here concerned with hopes or
fears, only with the truth as far as our
reason permits us to discover it.*
Charles Darwin

UNA NUEVA EDAD MEDIA

VIVIMOS en un mundo en crisis, la caída y atomización de la Unión Soviética ha provocado una retracción del pensamiento progresista en el mundo; las intensas disputas filosóficas y políticas que se dieron durante la mayor parte del siglo pasado en el frente intelectual han cesado o sólo ocurren marginal y esporádicamente; salvo honrosas excepciones, los críticos de la ideología del imperialismo, de sus sistemas de creencias y formas de manipulación, de sus recursos de control de las conciencias, cayeron en un estado de pasmo y cortedad, de parálisis silenciosa, de repliegue generalizado.

El reflujó tuvo consecuencias en todos los órdenes de la vida. En particular, desfondó la confianza de mucha gente en las capacidades del ser humano para comprender y transformar su entorno racional y responsablemente. Reconocido otrora como instrumento privilegiado de conocimiento, base de la promesa de que en el futuro todo sería mejor, el pensamiento científico genera ahora desconfianza y recelo; en general, se le juzga porque sus contribuciones en beneficio de la gente común son menores si se les compara con los servicios que el sistema de producción científica presta al aparato de dominación del complejo político-financiero-ideológico-militar que se alzó con la victoria de la *guerra fría*.

Con argumentos peregrinos, sus críticos atribuyen al racionalismo el haber deshumanizado y alienado la vida moderna¹ el pecado, dicen, es representar el mundo como si fuese un ente matemático abstracto y anular así la presencia de seres de carne y hueso con voluntad, deseos, sentimientos y emociones personales. Esta

* Ensayo escrito por Germinal Cocho, José Luis Gutiérrez y Pedro Miramontes. Publicado en Muñoz Rubio, J. (coord.), 2007. *La interdisciplina y las grandes teorías del mundo moderno*. México: CEIICH, UNAM.

¹ Véase "The 'Sin' of Galileo" en <http://www.friesian.com/mumford.htm>

tendencia es una de entre muchas formas de reaccionar a la dureza de la vida bajo el dominio de la economía de mercado y el capitalismo salvaje: grandes grupos de seres humanos dan la espalda al ejercicio crítico de la razón y se rehúsan a construir su concepción del mundo sobre esa base. Quizá como nunca antes o como sólo es concebible en las épocas más oscuras del medioevo, millones de hombres y mujeres viven sin esperanza y el sistema encuentra ahí un magnífico sustrato para promover formas dogmáticas de representar el mundo, que resultan propicias al control de las mayorías por unos cuantos. Precisamente por quienes ven a la gente no como seres humanos sino como instrumentos para producir mercancías e incrementar sus ganancias.

Lejos de volver al humanismo, de reconstruir una ética de la dignidad de las personas, basada en nuestra capacidad de discernir lo que está bien para decidir responsablemente, muchos adversarios de la ciencia han optado por buscar soluciones y consuelo en la iluminación, el inconsciente metafísico, la fuerza vital o la intervención divina y se multiplican las corrientes que recurren a explicaciones sobrenaturales, esotéricas o enraizadas en algún sistema religioso. Como si, al cabo de quinientos años, los hombres y las mujeres de nuestro tiempo no hubiesen aprendido a desprenderse del lastre de los dogmas y se hubieran apagado las luces, humanistas esas sí en un sentido auténtico y profundo, del Renacimiento y la Ilustración; como si la razón durmiese y, anunciada por los monstruos de su sueño, nos hubiera tocado dar testimonio del ocaso de una era y el inicio de una nueva Edad Media.

DISEÑO INTELIGENTE O EVOLUCIÓN POR SELECCIÓN NATURAL

Es posible que, debido a ese retraimiento general del racionalismo, la controversia entre el evolucionismo darwiniano y el creacionismo siga abierta en los países anglosajones² casi con la misma fuerza con la que se manifestó inmediatamente después de la publicación, en 1859, de *El origen de las especies*. En general, no suele ser ésta una discusión de interés científico, allá se la hayan los estadounidenses con sus fundamentalistas.

En cambio, sí nos importa considerar la crítica de la hipótesis neodarwiniana de la selección natural como motor primordial de la evolución, planteada por un grupo de científicos y académicos formados en los Estados Unidos, para abonar la tesis de que la vida no podría existir sin que hubiese un plan preestablecido, un *diseño inteligente* (o *teoría del ID*, por su sigla en inglés).

Como no hay diseño sin diseñador, la hipótesis implica la existencia y la intervención de una voluntad creadora, de un ser supremo. Y nos importa intervenir en el debate porque, desde la teoría de los sistemas complejos, es posible aportar argumentos que se atienen al principio del marqués de Laplace de no hacer de Dios una hipótesis necesaria y refuerzan la confianza en las posibilidades de la ciencia,

² Muy notoriamente en los Estados Unidos, donde a nivel estatal se ha legislado para obligar a los maestros de biología a dedicar el mismo tiempo de clase al evolucionismo que a la explicación del Génesis.

materialista y crítica, de superarse una y otra vez para hallar explicaciones más convincentes.

Quienes sustentan el ID son, casi todos, científicos con carreras académicas productivas dentro del *establishment* como el bioquímico Michael Behe, el microbiólogo Scott Minnich o el filósofo y matemático William Dembski.³ Cada uno en su campo, ha hecho aportaciones equiparables a la de cualquiera de sus pares en el sistema mundial de producción científica, conocen y han recorrido el camino de la contrastación de resultados y la crítica de los árbitros de las revistas especializadas en las que publican; son, por así decirlo, miembros reconocidos de la comunidad de estudiosos de las ciencias naturales y sus fundamentos matemáticos. Sobre esa base, apoyados por una institución llamada *Discovery Institute* a cuyo *Center for the Renewal of Science and Culture* (CRSC) están asociados, han presentado la teoría del ID como una consecuencia de sus estudios respecto a la evolución biológica.

El argumento básico es el siguiente: los organismos son tan intrincados; cada uno de sus detalles lo es; en cualquier nivel de organización de la vida pueden hallarse ejemplos: el ojo de los vertebrados, la coagulación de la sangre, la respuesta del sistema inmunológico, la composición química de la cola rotatoria que permite a los flagelados desplazarse en el medio acuático, la complicadísima fábrica del metabolismo y las funciones celulares... tal perfección sólo puede ser el resultado de un plan de una ingeniería de sistemas tan compleja que parece inaccesible a los seres humanos; es inconcebible suponer que las soluciones hayan podido encontrarse por el método de prueba y error de la selección. Según Minnich:⁴

Es válido preguntarse si el tiempo, el azar y las leyes de la física y la química —carentes de inteligencia, dirección y propósito— producen cosas que son más sofisticadas que la capacidad intelectual combinada de la comunidad de ingenieros de nuestros días.

Y la tesis fundamental de la propuesta es ésta: ciertas características del universo y, específicamente de los seres vivos, se explican mejor atribuyéndolas a una *causa inteligente* y no a la obra de un relojero ciego, no como el resultado de la selección natural.

En el amplio debate que esta propuesta ha generado en los Estados Unidos, los investigadores asociados al CRSC insisten en que la suya es una posición estrictamente científica, a la que han llegado con base en la evidencia acumulada y rechazan categóricamente que se les identifique con el creacionismo:

Emplear la expresión “creacionistas [partidarios del] diseño inteligente” es impreciso, inadecuado y tendencioso; especialmente cuando viene de científicos y periodistas empeñados en ser justos; no provee una descripción neutral de la teoría del ID; es una etiqueta polémica creada con propósitos retóricos.

³ Behe trabaja en el Departamento de Ciencias Biológicas de la Universidad Lehigh, en Pensilvania; Minnich es profesor asociado de la de Idaho; Dembski es profesor de teología y ciencia en el Southern Baptist Theological Seminary, en Louisville, Kentucky.

⁴ Citado por Than, Ker (2005) en “Intelligent Design: An Ambiguous Assault on Evolution”, en http://www.livescience.com/humanbiology/050922_ID_main.html

Por ejemplo, en un artículo de apoyo a la propuesta de George W. Bush de “enseñar el diseño inteligente a la par de la evolución”, Dembski sostiene:⁵

El diseño inteligente es un ganador en el debate sobre los orígenes de la vida no sólo porque está respaldado por ideas, argumentos y evidencias poderosas, sino también porque no lleva el debate a la controversia Biblia-ciencia. El diseño inteligente, a diferencia del creacionismo, es una ciencia por derecho propio y puede sostenerse a sí misma.

y rechaza los aspectos más débiles del creacionismo para tratar de convencernos de que su propuesta no es un episodio más de la equívoca disputa entre la fe y la razón.

Los científicos asociados con la propuesta del diseño inteligente forman la fracción intelectualmente avanzada del conservadurismo (aunque parezca oxímoron) y tratan de distanciarse lo más posible de las afirmaciones de quienes, en pleno siglo XXI, sostienen aún que la verdad sobre el origen de nuestro universo se halla literalmente en las Escrituras. Los investigadores asociados del CRSC rechazan la idea de la creación en seis días, aceptan que es insostenible atribuirle a la Tierra no más de 6 o 10 mil años de existencia; ya no se atreven a negar que haya ocurrido la evolución biológica; admiten que los ancestros de los seres humanos son comunes a muchos otros seres vivos.

Y no obstante, mal que les pese, la propuesta del diseño inteligente es nada más un *aggiornamento* del creacionismo porque, al cabo, renuncia a la búsqueda de una explicación materialista, contrastable con la evidencia experimental. De hecho, hace una petición de principio equivalente a la que, en el primer versículo⁶ del Génesis bíblico, convoca a dar por sentada la existencia de Dios pero la envuelve en los ropajes de la biología molecular y de cálculos basados en la teoría de las probabilidades. Con agudeza, insisten en su verdadero talante científico y se esfuerzan, como Dembski, en convencer a los creacionistas fundamentalistas (aunque parezca pleonasma) de que su propuesta es la mejor manera de no presentar flancos débiles en el debate con la ciencia materialista:⁷

Es cierto que, durante mucho tiempo, el creacionismo fue la posición de la Iglesia, desde los Padres hasta los Reformadores (aunque hubo excepciones como Orígenes y Agustín). No obstante, en aquella época, las enseñanzas de la Iglesia también sostenían que la Tierra era estacionaria. El Salmo 93 sostiene que la Tierra quedó afincada para siempre y no podría ser movida jamás.⁸ Una interpretación literal de este salmo tendría que aceptar el geocentrismo. Sin embargo, todos los creacionistas que yo conozco aceptan la revolución copernicana.

A pesar del esfuerzo de distanciamiento respecto al creacionismo, Dembski no deja lugar a dudas sobre qué partido tomar en la discusión entre ciencia y religión

⁵ Véase Dembski, William A. (2005), “Why President Bush Got it Right about Intelligent Design” en http://www.designinference.com/documents/2005.08.Commending_President_Bush.pdf

⁶ En el principio, Dios creó los cielos y la tierra (Génesis 1:1).

⁷ Véase Dembski, William A. (2005), *op. cit.*

⁸ Dios vistióse de magnificencia, ciñose de fortaleza y dejó firme el mundo para que no se moviera (Salmos 93:1).

ni, en última instancia, sobre los propósitos ideológicos de la promoción y defensa de su propuesta al presentarla como “una posición alrededor de la cual pueden unirse los cristianos de todas las tendencias” y hace un guiño para seducir a los creyentes de otras religiones deístas:⁹

El diseño inteligente... atribuye la complejidad y la diversidad de la vida a una inteligencia, pero no identifica esa inteligencia con el dios de ninguna fe religiosa o sistema filosófico... Aún así, reporta una ganancia inmediata: destruye la herencia atea de la evolución darwiniana... hace imposible la satisfacción intelectual de los ateos y se convierte en una herramienta apologética formidable pues permite abrir la reflexión teológica a individuos que pensaban que la ciencia había sepultado a Dios.

El problema no es entonces dilucidar si los partidarios del ID son creacionistas o no, sino de valorar, si es posible, su crítica a la propuesta neodarwiniana en sí misma, evitando descalificarla por las consecuencias sobrenaturales que ellos se empeñan en deducir. Y esto sí es un problema que nos atañe como evolucionistas porque el cuestionamiento sobre si la selección natural ha sido suficiente para producir el ojo de los vertebrados o la fábrica celular tiene antecedentes notables que de ninguna manera deberían hacerse a un lado.

El objeto principal de este trabajo es responder afirmativamente a la pregunta de Minnich sobre “si el tiempo, el azar y las leyes de la física y la química” son capaces de producir la perfección de la vida y hacerlo considerando las críticas a la propuesta neodarwiniana desde una perspectiva materialista: la evolución biológica ocurre en un espacio limitado de formas y funciones al cual se restringe la búsqueda de la selección natural y en donde el papel del azar queda, asimismo, fuertemente acotado. Las limitaciones en el espacio de búsqueda ocurren en todos los niveles de organización de la materia viva: las hay en la termodinámica y la estructura del DNA y las proteínas; en la arquitectura modular de los organismos; en los mecanismos morfogenéticos y de formación de patrones. Además, y aunque parezca contradictorio, la presencia simultánea de varios mecanismos estocásticos implica resultados fuertemente deterministas y esto reduce notablemente las cosas que han pasado en la historia de la vida sin otra razón que la de la suerte.

El marco teórico que articula nuestras intenciones se llama teoría de los sistemas complejos y es una síntesis de los conocimientos contemporáneos de la física, la matemática, la biología y las ciencias de la computación.

Al final argumentaremos que la lucha contra el creacionismo y su clon moderno, el diseño inteligente, se debe de dar desde la trinchera de los sistemas complejos. La formulación neodarwinista de la evolución, con su tradicional desdén por la física, no sólo no basta para enfrentar al creacionismo sino que en múltiples ocasiones le facilita flancos débiles que éste aprovecha para desacreditar el proceso entero de la evolución.

⁹ Cfr. en http://www.designinference.com/documents/2005.08.Commending_President_Bush.pdf

Construir puentes, definir convergencias o encontrar la síntesis de aspectos de la naturaleza aparentemente ajenos, han sido procesos fundamentales en la historia de la ciencia. En la física, por ejemplo, la mecánica newtoniana unifica los fenómenos celestes y los que tienen lugar en la Tierra. Uno de los mayores méritos de Isaac Newton fue descubrir que la misma ley que rige el tránsito de los astros en el cosmos, gobierna también la caída de las manzanas en la Tierra. James C. Maxwell descubre o inventa la forma de sintetizar en un solo cuerpo teórico formal electricidad, magnetismo y óptica. El trabajo de Einstein sobre el efecto fotoeléctrico unifica concepciones aparentemente irreconciliables acerca de la naturaleza de la luz.

Cuando las síntesis tienen lugar dentro de un paradigma (Kuhn, 1999), contribuyen a la maduración de la forma de pensar vigente. En cambio, si se dan en el momento de la convergencia antagónica de paradigmas diferentes o en medio de una lucha que tiene como resultado la destrucción de uno de ellos, se dice legítimamente que se ha dado una revolución científica.

En la teoría sintética de la evolución fue necesario tender los puentes entre evolucionistas atentos a dos tipos de causas: las próximas y las remotas; entre dos tradiciones de investigación, la de la genética mendeliana y la de los naturalistas; entre biólogos de laboratorio y biólogos de campo.

Pero *la síntesis* fue sólo el resultado de un proceso de convergencia y no una revolución científica en el sentido de Kuhn. El paradigma de la inmutabilidad biológica ya había sido minado y hecho volar en pedazos por los evolucionistas del XVIII y XIX, la revolución había dado sus primeros pasos con Etienne Geoffroy Saint-Hilaire, Erasmus Darwin y Jean-Baptiste Lamarck y, posteriormente, al sustituir las formas viejas de pensamiento con el convencimiento del cambio de las especies, Charles Darwin y Alfred Russel Wallace la habían convertido en una revolución triunfante. La síntesis fue su culminación: la robusteció y mostró su inmensa fecundidad como idea articuladora esencial del pensamiento biológico.

Con todo, aún en los años veinte y la primera mitad de los treinta del siglo XX había grandes diferencias entre los evolucionistas darwinianos y los genetistas. Los primeros eran zoólogos, paleontólogos o botánicos, con largas carreras de práctica en el campo y defendían la tesis de la evolución gradual y de la selección natural como fuerza directriz. Por su parte, los mendelianos eran genetistas de laboratorio y para ellos, como lo ilustra el caso de Hugo de Vries, la presión mutacional, al actuar en pequeñas poblaciones, era la responsable de la evolución no sólo sin la ayuda de la selección natural sino en ocasiones en oposición a ella y, como la variación mutacional es discontinua, la evolución tendría que ocurrir a saltos.

Asimismo, según Ernst Mayr, la discordia provenía de las formas de pensar esencialmente distintas de los actores del diferendo; sus preocupaciones estaban motivadas por "biologías diferentes": una, atenta a las causas próximas, la otra, a las causas últimas. Esta diversidad de intereses es sustancial para comprender los escollos que debieron librarse en la elaboración de la síntesis.

Además, en cada campo se trataban niveles diferentes de la jerarquía evolutiva: desde la perspectiva de los genetistas, bastaba entender lo que ocurre a nivel de los genes para comprender el proceso evolutivo pues la adecuación total sería la suma de la adecuación de los genes individuales; los naturalistas, a su vez, no veían conexión alguna entre los cambios de las frecuencias génicas y los acontecimientos evolutivos en los niveles jerárquicos de especies y taxones superiores.

Las grandes discrepancias entre los genetistas experimentales y los naturalistas de poblaciones eran, del mismo modo, resultado de diferentes tradiciones de investigación de cada grupo. Para cada quien, la suya era superior a la contraparte que “simplemente no comprendía ni los hechos ni los asuntos importantes”.

La síntesis evolucionista fue entonces obra de constructores de puentes: miembros de la escuela genético-naturalista como Sergei S. Chetverikov; genetistas como Edmund B. Ford; sistematistas como Bernhard Rensch, Ernst Mayr y George G. Simpson; zoólogos como Julian S. Huxley y botánicos como Edgar Anderson y George L. Stebbins, todos ellos biólogos diatópicos –con un pie en cada lado– investigadores en una de las zonas capaces de comprender lo que hacían los de la otra; arquitectos que empezaron por crear la nueva terminología que sería el lenguaje común de todos los biólogos evolucionistas.

En el momento de la síntesis, los experimentos en genética de base mendeliana habían producido ya tantos éxitos que su traslado al campo de las interpretaciones evolutivas satisfizo la necesidad de tener una teoría de la herencia bien fundamentada y produjo una confianza absoluta en sus capacidades explicativas. Por ejemplo, el genetista ucraniano-estadounidense Theodosius Dobzhansky llegaría a sostener que “nada tiene sentido en biología si no es a la luz de la [teoría sintética de la] evolución” y, en 1986, Richard Dawkins escribiría en el prólogo de *The Blind Watchmaker*:

Si la existencia de los seres humanos fue, alguna vez, el mayor de los misterios, ha dejado de serlo porque Darwin y Wallace lo develaron y a nosotros sólo nos queda añadir notas al pie en las páginas de su explicación. He escrito este libro convencido de esto y porque me sorprendía la gran cantidad de gente que ignoraba la elegante y hermosa solución propuesta para éste, el más profundo de los problemas y ni siquiera se había percatado, en muchos casos y en primer lugar, de que en esto hubiese un problema.

En el ámbito de las ciencias naturales es raro hallar quien haga afirmaciones tan contundentes; mas, a despecho de que las citas de Dobzhansky y de Dawkins tengan el tono de algo inevitablemente cierto, durante los últimos cincuenta años no ha dejado de haber controversias notables alrededor de esto, observaciones críticas sobre las fallas en el aparato neodarwinista o los huecos notables en sus explicaciones. Incluso, a despecho de la aparente unidad de pensamiento en los aspectos centrales de la hipótesis, es posible identificar corrientes divergentes cuyas discrepancias con el pensamiento dominante ponen en tela de juicio el optimismo incondicional y totalizador.

No obstante, la teoría sintética –o neodarwinismo– se considera hoy por hoy la más robusta y la de mayor capacidad para explicar cómo se originó y se ha ido

transformando la multitud de seres vivos que alguna vez han poblado nuestro planeta. En los términos de Thomas Kuhn (1999), en nuestros días la hipótesis neodarwiniana es, por mucho, el paradigma dominante en biología.

SISTEMAS COMPLEJOS

La ciencia es un producto de la humanidad que busca una explicación de los fenómenos naturales y –a diferencia de otro tipo de explicaciones como las religiosas o las místicas en donde las verdades se establecen de una vez y para siempre– la ciencia está sujeta al escrutinio, revisión y corrección constantes por parte de la comunidad que la produce. El neodarwinismo no ha podido dar respuesta a múltiples problemas (ver más abajo) y por lo tanto hay lugar para nuevas propuestas que intenten abonar a lo ya construido en la evolución biológica.

Algunos de estos intentos vienen arrojados por la teoría de los sistemas complejos. Un sistema complejo, en su acepción más simple, consta de componentes que interactúan y que pueden modificar sus estados internos como producto de las interacciones. Normalmente, el número de componentes es suficientemente grande para que su estudio *à la* Newton (plantear un sistema de ecuaciones diferenciales con una por cada grado de libertad) sea imposible y, a la vez, suficientemente pequeño para que el formalismo de la mecánica estadística –en donde los promedios de magnitudes microscópicas dan sentido al uso de variables macroscópicas– no sea válido. Habitualmente se cuenta con la presencia de dinámicas antagónicas, lo que trae como resultado que las interacciones no sean lineales. Un sistema complejo es reconocible por su comportamiento y sus rasgos más notables son la autoorganización, la frustración y la evolución hacia la zona crítica. También exhiben leyes de escalamiento espacio-temporales y, fundamentalmente, emergencia de patrones (Ramírez, 1999).

La *emergencia* es el proceso de nacimiento de estructuras coherentes y discernibles que ocurren como resultado de la interacción de los componentes individuales de un sistema complejo. La emergencia es un comportamiento colectivo que no se puede deducir de las propiedades o rasgos de los componentes del sistema. Los fenómenos emergentes pueden ser tanto espaciales (emergencia de formas o patrones geométricos), como temporales (conductas, procesos o funciones nuevas).

La filosofía central de la teoría de los sistemas complejos tiene sus raíces en el siglo V antes de nuestra era con el filósofo helénico Heráclito de Abdera, para quien las relaciones y los procesos entre las cosas eran más importantes que las cosas mismas. De la misma época nos viene la dicotomía del funcionalismo y el estructuralismo. En el primero se propone que la función moldea la estructura y que consecuentemente la forma de los seres vivos ha surgido, a lo largo de miles de millones de años, como una recompensa a su utilidad ante presiones del medio ambiente. En sentido contrario, desde el estructuralismo, la función depende de la forma, que es consecuencia de las propiedades de la materia en sus diversos grados de organización jerárquica. La teoría de los sistemas complejos es eminentemente estructuralista. Una exposición, completa y erudita, aunque no imparcial, de estas

dos grandes corrientes, se puede encontrar en el último libro de Stephen Jay Gould (2002).

El estructuralismo hunde sus raíces en la filosofía de Heráclito y de Platón y, en biología, es posible hallar un hilo conductor (Miramontes y Gutiérrez, 2002) desde éstos hasta sus más recientes exponentes, dispersos hoy por todo el mundo. Hay diferencias relativamente importantes entre las distintas ramas del estructuralismo; entre los más radicales, si se nos permite la expresión, se distingue el biólogo anglocanadiense Brian Goodwin, para quien,¹⁰

Darwin convirtió la biología en una ciencia histórica y, en el darwinismo, las especies son simplemente accidentes de la historia que carecen de una naturaleza inherente. Son, solamente, lo que debe pasar para que las cosas funcionen y no hay ninguna restricción particular que signifique que las cosas no pudieran funcionar de otra manera. Considérese, por ejemplo, la estructura de los brazos y de las alas de las aves: siempre tienen un solo hueso en el extremo, nunca dos y, aunque un par hubiese sido muy útil para los pájaros, la evolución nunca lo produjo. Al parecer, esto es algo que, simplemente, no puede ocurrir por la existencia de una restricción intrínseca en el proceso del desarrollo y hay evidencia de muchas restricciones de ese tipo en toda la biología.

Otro estructuralista contemporáneo es Stuart Kauffman quien, con base en la teoría de los sistemas complejos, ha apuntado hacia posibles soluciones para los grandes problemas de la biología de nuestros días; en particular, en los temas totales de la evolución y el desarrollo. Como Goodwin, Kauffman parte de los principios generales que rigen a la materia en el universo pero, a diferencia de Brian, quien le da a la selección natural poca relevancia, Stuart la considera un factor siempre presente en los mecanismos de la evolución aunque no sostiene que sea el único mecanismo evolutivo.

La escuela sintética es funcionalista en gran proporción. Desde luego, todos sus seguidores comparten la tesis de que por el mecanismo de la selección natural es que se produce la emergencia de nuevas especies y en este esquema, los rasgos adquieren valor selectivo por su función. Otro rasgo de esta escuela es su posición ante el papel del azar¹¹ en la historia de la vida.

Para Stephen Jay Gould, la evolución biológica es una larguísima cadena de hechos fortuitos y circunstanciales en donde cualquier cambio en un solo eslabón hubiera podido producir una historia de la vida radicalmente distinta. Gould dice que si se volviese a producir desde el big-bang “la cinta” con la historia del universo, la inmensa lista de casualidades que dieron por resultado la vida, podría no haber ocurrido jamás; así, la vida resultaría un proceso único e irrepetible porque (Gould, 1994):

La historia conlleva demasiadas contingencias de manera que el estado actual ha sido modelado por largas cadenas de estados antecedentes impredecibles y no por la determinación inmediata de las leyes de la naturaleza, invariantes en el tiempo.

¹⁰ En una entrevista publicada en *GenEthics News*, 11, marzo-abril de 1996, pp.6-8.

¹¹ Es necesario destacar la posición encontrada que sostiene Christian de Duve. Ver la bibliografía.

El espectro de los pensadores evolucionistas es amplio y se puede decir que el escenario del debate de los científicos en torno a la evolución biológica está jalado por divergencias relativamente menores, como las de la hipótesis del equilibrio puntuado de Eldredge y Gould respecto al gradualismo neodarwiniano, y por fracturas profundas que tienen que ver con temas como la preponderancia atribuida a la selección natural como mecanismo prácticamente único del proceso evolutivo; con la relación entre genes y fenotipos; con la presencia de restricciones que acotan el espacio de las configuraciones factibles; y, si se quiere ver así, con el conflicto entre una visión contingencista de la historia de la vida. Ésta la concibe como una larga cadena de casualidades donde pudo haber resultado cualquier otra cosa (incluso nada, la ausencia misma de la vida), y una visión del azar y la necesidad en donde ésta impone límites a lo fortuito, para que el “relojero ciego” de Dawkins se atenga a fabricar sólo lo que es estructuralmente posible.

La propuesta fundamental de la teoría sintética tiene fallas profundas, deja preguntas esenciales sin respuesta y no ofrece solución para muchos problemas. En su espléndida discusión sobre los orígenes del orden biológico, Stuart Kauffman (1993) resume los que a su juicio son más importantes:

- la circularidad del concepto de selección natural (un concepto tautológico);
- el panseleccionismo o suposición de que todos los rasgos en un organismo aparecen como resultado de algún proceso de selección positiva;
- la selección restringida, en donde la operación del mecanismo se asocia con una función *ad hoc* para explicar la aparición de un rasgo;
- la abundancia inesperada de la variación, incompatible con la idea de que, para existir y garantizar la persistencia de sus descendientes, los organismos deben estar adaptados plenamente;
- el problema de los fenotipos faltantes;
- la estasis fenotípica;

A esta lista se pueden agregar problemas adicionales y, según nosotros, quizá más importantes:

- las grandes transiciones en biología,
- el origen de las formas vivas,
- la falta de evidencia, directa o indirecta, de casos de especiación por el mecanismo de selección natural.

Y, a despecho de la opinión dominante, estas deficiencias sugieren que aún está por construirse la mayor parte de una (verdadera) teoría de la evolución convincente.

Además, si algo explica, la propuesta neodarwiniana lo hace refiriendo todo el proceso evolutivo a la adaptación, restringida al paso paulatino de unos fenotipos a otros –mediante los correspondientes cambios en las frecuencias alélicas–, inducidos por la variabilidad del medio; pero la selección natural opera sobre organismos ya existentes, considera tasas de reproducción diferenciada de acuerdo con su funcionalidad respecto al medio, no explica el origen de la vida y sus aportaciones acerca de la aparición del orden, la forma y la estructura o tampoco existen o son notablemente endeble. Pero una teoría completa de la evolución deberá, sin duda, incluir no sólo cómo los seres vivos se transforman y desaparecen sino cómo surge, en ellos, la estructura funcional, adaptada y adaptable que, hipotéticamente, habrá de ser objeto de selección.

LA CIENCIA REDUCCIONISTA

Como resultado de las tradiciones y costumbres de la cultura en la que se crece, la gente suele apropiarse de una visión del mundo que llama “sentido común”; éste se acepta colectivamente como verdad indiscutible, se defiende con pasión y se convierte en uno de los mayores obstáculos para reconocer cuándo hay evidencia en contra aunque sea patente.¹²

En nuestros días, una parte importante del “sentido común” se produce en los centros de investigación científica, se difunde mediante la educación formal o a través de los medios masivos de comunicación como parte de un esfuerzo –estatal y de los grandes grupos de poder económico– que induce cierta uniformidad de pensamiento necesaria para la preservación del *statu quo* entre los grupos ilustrados de la sociedad. Este conjunto de creencias es lo que el embriólogo británico Conrad Hal Waddington llamó “el saber convencional de la clase dominante” o *cowdung*.¹³

El sentido común pertenece –quizá con diferentes grados de articulación discursiva, según los estratos sociales– a toda la sociedad, sin importar el grado de educación formal que se tenga, pero el *cowdung* es el soporte sobre el cual se argumenta académicamente. Darse cuenta de las limitaciones impuestas por ese saber convencional exige, muchas veces, un ejercicio crítico, abierto y desprejuiciado, al que, paradójicamente, no siempre están acostumbrados los científicos.¹⁴ Esto puede implicar resistencias tan grandes en el seno de una comunidad de pensamiento, que las críticas se desdeñan, se descalifican y se atribuyen a la impericia, la ignorancia o la mala fe del detractor.

Si adoptamos la propuesta de Thomas Kuhn,¹⁵ hace falta una acumulación ca-

¹² Al modo en que, según cierta leyenda, los colegas de Galileo se negaban a ver las lunas de Júpiter por no descreer de las enseñanzas de los peripatéticos, sus maestros, quienes sostenían la imposibilidad de que algún cuerpo celeste pudiese no girar alrededor de la Tierra.

¹³ Acrónimo de la expresión en inglés *The conventional knowledge of the dominant group*. Véase, al respecto, el ensayo de José Luis Gutiérrez, 2002, “Waddington, Thom y la biología teórica” (p.29).

¹⁴ De donde resulta que los profesionales de la ciencia no necesariamente tienen siempre actitudes científicas o críticas ni, mucho menos, progresistas.

¹⁵ Véase *La estructura de las revoluciones científicas*.

tastrófica de evidencia que comience por convencer a los menos ideologizados o comprometidos con el *establishment* (normalmente, los jóvenes) para que, en un proceso que él llama “sustitución de paradigmas”, las nuevas ideas modifiquen o sustituyan a las antiguas. Incluso, para que sea posible este proceso, a veces se precisa que muera toda la generación educada en las viejas ideas.

Las discusiones acerca de la evolución biológica –como se puede confirmar en la crónica de la disputa sobre el gradualismo y el programa adaptacionista– dan un buen ejemplo de situaciones extremas en las que el conocimiento convencional se convierte en una barrera casi infranqueable para dirimir racionalmente las controversias. Para empezar, se da por hecho que *evolución* es sinónimo estricto de *selección natural*; pero ésta es, únicamente, un mecanismo teórico e hipotético, una propuesta de trabajo.

El saber convencional en Occidente ha sido construido sobre la idea de que, para conocer algo, es preciso separarlo en sus componentes elementales, romperlo en sus partes, y estudiar la conducta de éstas porque, entonces, será posible entender el comportamiento del objeto de estudio primario como el resultado de la acción mecánica, acumulada y lineal¹⁶ de ellas. De este modo, se trata de “reducir” el problema inicial, que puede ser muy complicado, a problemas más simples.

Ese es el método reduccionista de la ciencia.¹⁷ Los avances en el conocimiento y la tecnología debidos a él son innegables y numerosos; su hegemonía se debe, sin duda, a esos éxitos. Sus logros más altos se han dado, a nuestro modo de ver, en la mecánica cuántica y en la biología molecular.¹⁸ No obstante, las limitaciones del reduccionismo son enormes porque –como ya lo advertía Aristóteles en el siglo IV antes de nuestra era– en general, no es cierto que el todo sea igual a la suma de las partes.

Empero, el éxito del método reduccionista, influye tanto al saber convencional, que determina una concepción del universo, una visión del mundo y, desde luego, una idea de qué es y qué no es el conocimiento científico. De hecho, en la cultura occidental se tiende a creer que hacer ciencia implica siempre reducir al mínimo, describir tan detalladamente, que sea evidente que se ha llegado a los límites en la descomposición de lo que se está estudiando (en realidad, no existen límites en la naturaleza, son las fronteras disciplinarias las que ponen las barreras). El camino inverso al del reduccionismo –llamémoslo, de manera temporal, integracionismo– cuya necesidad habría sido sugerida ya por el Estagirita, ha sido marginal en la construcción del conocimiento científico y sólo empezó a despuntar en el último tercio de siglo.

La hipótesis de la selección natural como mecanismo del proceso evolutivo es, de igual manera, reduccionista. Lo mismo en la propuesta original de Darwin que

¹⁶ Esto significa que la acción acumulada es proporcional a la causa y aditiva.

¹⁷ Los especialistas reconocen diferentes tipos de reduccionismo (ver por ejemplo: Ruse, M. (1988), *Philosophy of Biology*. Nueva York: Albany). Para no enturbiar nuestra exposición, aquí usamos el que es intuitivamente reconocido por cualquier estudioso de las ciencias naturales, el a veces llamado *reduccionismo metodológico*.

¹⁸ Por cierto, ambas muestran, también, las extraordinarias posibilidades del método deductivo de la ciencia.

en la síntesis de mediados del siglo pasado aunque en ésta lo es más claramente: en ella, la explicación del origen de las nuevas especies se reduce a la acumulación exitosa de errores (mutaciones aleatorias), amplificadas por la selección natural. Desde esta perspectiva, es posible comprender toda la historia de la vida en la Tierra estudiando a los agentes responsables de transmitir la información que va a pasar de una generación a otra. Es decir, es suficiente conocer detalladamente los genes.¹⁹

Sin embargo, dilucidar cómo ocurre la evolución biológica es un problema sumamente intrincado porque se trata, por un lado, de un proceso histórico, sujeto a multitud de contingencias azarosas que operan, en un sentido amplio, sobre la fisicoquímica de la vida y, por otro, también es un proceso que tiene que ser compatible con las leyes naturales que implican fuertes relaciones causales y muchas veces, deterministas.

EL PROBLEMA DEL ORIGEN DE LA FORMA

De los problemas que la selección natural encara sin éxito, uno de los más relevantes desde nuestro punto de vista es el del origen de las formas vivas. En este apartado vamos a discutirlo desde sus fundamentos. Para hacerlo, necesitamos de un concepto familiar en física y química: el rompimiento de simetría.

Comenzamos con un experimento mental: como se sabe, la esfera es el cuerpo geométrico que posee la mayor simetría; es simétrica con respecto a un punto, su centro, a cualquier línea que pase por su centro, los diámetros, y lo es con respecto a cualquier plano que contenga a cualquiera de sus diámetros. Si nos imaginamos una esfera perfecta, el arquetipo platónico, suspendida en el vacío, no existe manera ni experimento físico que nos permita dilucidar a distancia si ésta se encuentra girando o si está en reposo. Para saberlo, sería necesario marcar la superficie de la esfera y este acto le resta automáticamente al menos un grado de simetría: se gana información pues ahora sabemos si gira o no, pero a costa de un precio: la pérdida de simetría.

Otro ejemplo: imaginemos un material cristalino, la sal común, por ejemplo. Un cristal es la repetición uniforme y monótona de una estructura elemental; no hay manera de distinguir una unidad de la otra y el universo se ve igual sin importar en qué dirección se mire. Un cristal no puede contener información, en un cristal no podemos escribir un cuento o una fórmula matemática. Para poder hacerlo, sería necesario violentar la estructura cristalina y que las diferencias en su geometría pudiesen contener información cifrada en algún código. De nuevo, la información se paga en divisa de simetría.

Estos hechos, aparentemente simples, son la base conceptual para comprender un fenómeno que está en el núcleo del origen de las formas, tanto en el mundo de la materia viva como de la inanimada. Regresando al primer ejemplo: si en la esfera dibujamos un círculo paralelo al ecuador, éste nos puede indicar si la esfera gira siempre y cuando el eje de giro no sea el eje polar. Si esto sucede, entonces

¹⁹ Véanse, además de las obras citadas de Richard Dawkins, el libro de Helena Cronin (1992).

necesitamos romper aún más (dibujando, digamos, un meridiano) la simetría de la esfera. En resumen, las sucesivas rupturas de simetría son la base para que la figura pierda uniformidad y cambie su homogeneidad por estructuras espaciales discernibles, que no son otra cosa que *la forma*.

Traslademos nuestros experimentos al ámbito biológico: si la esfera es un óvulo fecundado, se dividirá en dos, luego en cuatro, en ocho, y así sucesivamente hasta formar una esfera de miles de células. Como se sabe, este proceso no continúa indefinidamente: en un momento preciso del desarrollo del embrión, se pierde la simetría esférica y, en los cordados, persiste únicamente la simetría bilateral que los caracteriza. En este caso no ocurre nada más una ruptura de simetría espacial, también se da una funcional: las células dejan de ser idénticas y se diferencian en lo que posteriormente serán los tejidos del organismo.

Las rupturas de simetría, tanto geométricas como funcionales, se dan bajo ciertas condiciones muy generales de manera espontánea en la naturaleza. Cuando esto ocurre, a esta espontaneidad se le llama *autoorganización* y es un fenómeno bastante común como veremos enseguida.

LA AUTOORGANIZACIÓN

La selección natural, en su más profunda intimidad (si se nos permite la expresión), puede verse como una propuesta para extraer orden a partir del desorden. En un mar de desorden mutacional aleatorio, la selección natural, hipotéticamente, acepta aquellas mutaciones benéficas para las especies y las fija en el linaje de cada organismo. Existe la creencia, producto de la confusión entre *el proceso evolutivo y el mecanismo de la selección natural*, de que debido a la producción de orden desde el desorden, hay algo en la evolución que va en contra de la segunda ley de la termodinámica. Quienes piensan así han clamado que, por lo tanto, la biología tiene leyes propias, distintas de las de la física. Afortunadamente, esta postura va disminuyendo y términos otrora muy socorridos, como “negantropía”, están cayendo en desuso. Las leyes de la termodinámica, como las de la física entera no hacen distinción entre materia viva o inerte. En palabras de Arthur Eddington (1948):

Si, por un acaso, su teoría se levanta en contra de la segunda ley de la termodinámica, entonces no hay esperanza: sólo queda aceptar su fracaso en medio de la mayor de las humillaciones.

Pese al consejo de Eddington, el problema de fondo sigue vigente: ¿cómo surgen estructuras sumamente ordenadas y coherentes, como los seres vivos, a partir del desorden de la materia inerte? La selección natural no puede ser la respuesta a esta pregunta pues su margen de actuación se reduce a organismos ya existentes.

La termodinámica moderna (Kondepudi y Prigogine, 1998) nos enseña que es posible la aparición de estructuras ordenadas a expensas del aumento local de la entropía. Este proceso puede ocurrir de manera espontánea y se conoce, de nuevo, como *autoorganización*.

La autoorganización es un fenómeno que los físicos conocen desde hace mucho tiempo, ocurre en sistemas abiertos desde el punto de vista termodinámico; esto

es, que pueden intercambiar, masa, energía o información con su entorno. Hay numerosos ejemplos. El siguiente, sumamente sencillo, nos permitirá entender el principio fundamental sin necesidad de entrar en detalles.

En la figura 1 se muestra esquemáticamente un fluido en un recipiente visto horizontalmente de canto. Las flechas desordenadas nos indican que las moléculas del líquido aislado de su medio pueden moverse en cualquier dirección. Si se aplica calor en la parte de abajo del recipiente, éste se trasmite a las capas superiores del líquido mediante difusión, mientras la diferencia de temperaturas entre la base y la parte superior del recipiente no sea muy grande. Si el gradiente de temperatura sobrepasa un umbral, entonces el mecanismo de transmisión del calor deja de ser la difusión y domina la convección (el transporte de masa de líquido más caliente hacia arriba y menos caliente hacia abajo). En el lado derecho de la figura 1 se observa que el movimiento del líquido produce, de manera espontánea, sin directriz externa o codificada en las moléculas, un patrón geométrico sumamente ordenado que se conoce como las celdas de Bénard. Si se hace una toma desde arriba del recipiente se observa que las celdas son hexágonos perfectos. Así, la autoorganización es un proceso que sólo puede ocurrir en sistemas abiertos en los cuales las interacciones locales (de las moléculas del líquido que se calienta) producen, de manera espontánea, la aparición de correlaciones de largo alcance (los movimientos convectivos en giros circulares de sentido alternativamente opuesto).

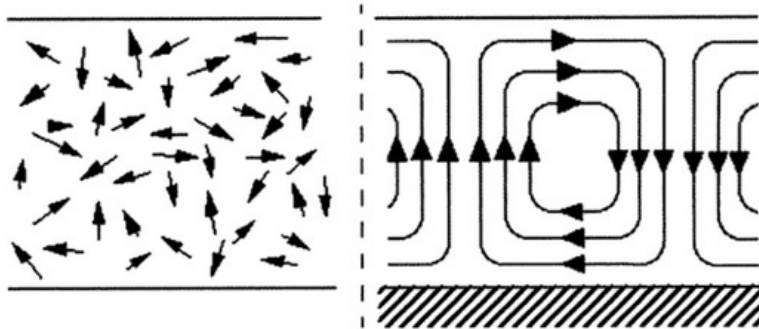


Figura 1

En la siguiente sección veremos que la autoorganización no es un juguete propiedad exclusiva de los físicos.

LA FILOTAXIA

Desde tiempos inmemoriales, la gente se percató de las regularidades geométricas en la morfología de las plantas: el número de pétalos de una flor, el de las espirales que forman las inflorescencias del centro de un girasol, la disposición de los brotes a lo largo del tallo, siguen patrones geométricos dominados por los números de Fibonacci. El estudio formal de las estructuras que se forman mediante los cruces

de espirales levógiras y dextrógiras, que siguen una numeración de Fibonacci comenzó aproximadamente en 1750, con los estudios del francés Charles Bonnet²⁰ y aún prosiguen pues es un fenómeno que no se ha comprendido cabalmente.²¹

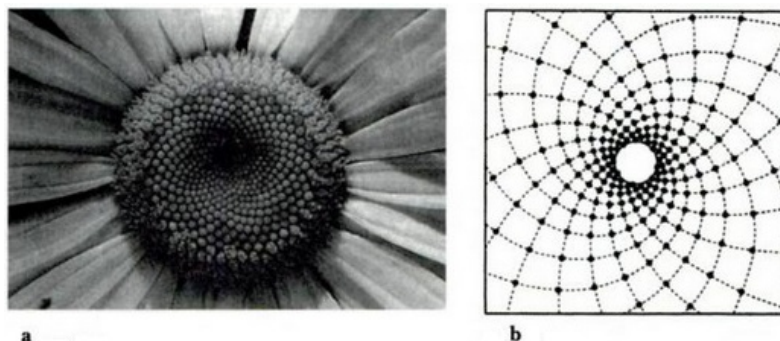


Figura 2

La figura 2a muestra una fotografía del centro de un girasol, en la cual son claras las espirales mencionadas arriba. La figura 2b fue tomada del experimento llevado a cabo por S. Douady y Y. Couder, físicos franceses (Douady y Couder, 1996). Dicho experimento registra los patrones que surgen cuando se colocan en un disco gotas de un líquido metálico que se repelen entre sí y que, simultáneamente, se encuentran sometidas a una fuerza radial que las obliga a moverse del centro del disco hacia la periferia. El patrón que se obtiene es el resultado del concurso de ambas fuerzas y, dado que no existe instrucción alguna, previa a la ejecución del experimento, que dirija a las gotas a seguir esas rutas, nos encontramos ante un claro ejemplo de autoorganización.

¿Hasta dónde se puede llevar la analogía a las plantas? Muy lejos: hay razones fundadas (Meinhardt, 2003) para suponer que los brotes (meristemos) en una planta surgen en los sitios que garantizan la máxima distancia entre ellos y son compatibles con la dinámica de crecimiento de la planta. En este caso, nos encontramos ante un ejemplo de *universalidad dinámica* (Cocho y Miramontes, 2000). Independientemente del sustrato material que sustente los procesos, estos exhiben las mismas formas macroscópicas pues lo importante es la dinámica generadora de dichas formas. En la naturaleza no hay casualidades.

El concepto de autoorganización está empezando a adquirir legitimidad en la literatura en biología, una simple búsqueda del término en la base de datos bibliográficos *PubMed* arroja decenas de artículos recientes.

La selección natural, en cambio, no tiene explicación alguna para la geometría de las plantas. Existen algunos trabajos que intentan asignar valor adaptativo a

²⁰ Charles Bonnet. *Recherches sur l'Usage des Feuilles dans les Plantes*. 1754.

²¹ Una discusión más detallada que incluye la perspectiva evolucionista puede verse en "¿Podemos explicar las formas vivas? Una flor para Fibonacci" de P. Miramontes y J. L. Gutiérrez.

la numeración de Fibonacci pero son rebuscados y poco convincentes. En cada párrafo nos recuerdan al bueno del doctor Pangloss.

AZAR Y NECESIDAD O LOS LÍMITES DE LO CONTINGENTE

La teoría sintética de la evolución hace depender fuertemente del azar la presencia de mutaciones que podrían ser fuente de variabilidad genética; ésta es una de las hipótesis centrales de la propuesta neodarwiniana: los cambios en el genotipo de una población ocurren merced a que algunas mutaciones prevalecen y producen la aparición de nuevos rasgos en la especie. Entonces, la selección actúa y persisten las características de los individuos mejor adaptados a su medio. Desde luego, sin la presencia fortuita de las mutaciones, no habría materia sobre la cual operase el mecanismo seleccionador. La fortuna es, pues, esencial.

Además, esta absoluta dependencia de lo aleatorio, da a los creacionistas un argumento más en su alegato contra la evolución biológica como un proceso natural:²² si la historia de la vida es una larguísima cadena de casualidades al nivel de sus componentes últimos, y si, de esta serie de golpes de fortuna emergen estructuras con capacidades de autorregulación y aprendizaje permanentes que les permiten mantener su coherencia en un equilibrio dinámico mientras permanecen vivos... entonces no sería descabellado suponer que le sería posible a cincuenta monos, tecleando al azar, escribir *Los hermanos Karamazov* o *En busca del tiempo perdido*, pero como esto es absolutamente imposible, sólo un diseño inteligente, debido a la intervención divina, podría explicar la vida.

La fragilidad del argumento no escapaba a la agudeza de Darwin; en el quinto capítulo de *El origen de las especies* dejaba clara su posición:

Hasta el momento, algunas veces me he expresado como si las variaciones –tan comunes y multiformes en los seres orgánicos domesticados y, en menor grado, en los silvestres– se debieran a la suerte. Esta es, desde luego, una forma de expresarse completamente incorrecta, pero sirve para reconocer plenamente nuestra ignorancia acerca de la causa de cada variación particular.

DE LA FRAGILIDAD DE LO FORTUITO

En lo esencial, la ignorancia persiste y la hipótesis básica de la teoría sintética sigue siendo, a juicio nuestro, insuficiente. No obstante, aunque se supusiera que las mutaciones génicas y la recombinación cromosómica son la fuente de la variabilidad necesaria para la evolución, es posible que los alcances del factor propiamente aleatorio sean muy limitados por “la naturaleza del azar”, expresión cuyo significado explicamos enseguida.

Por definición, lo aleatorio implica siempre un comportamiento irregular, absolutamente desordenado, impredecible; su presencia impide hallar pautas relacionales sobre las cuales proponer explicaciones de los procesos y, por ello, se dice

²² Como decía Laplace: algo en donde Dios no es una hipótesis necesaria.

que el azar no porta información. Esta idea, la de la aparente imposibilidad de conocer realmente lo fortuito, permeó la epistemología y el pensamiento científico, al menos desde la época de Laplace y su *Essai philosophique sur les probabilités* de 1814 hasta la mitad de siglo pasado. En 1949, B. V. Gnedenko y A. N. Kolmogorov, eminentes matemáticos soviéticos, sugerían una nueva forma de concebir al azar:

Todo el valor epistemológico de la teoría de la probabilidad se basa en esto: que los fenómenos aleatorios a gran escala, en su acción colectiva, *crean una regularidad no aleatoria estricta*.²³

Esto quiere decir que aún cuando imaginemos la existencia de componentes aleatorios de un sistema –azarosos en el más estricto sentido–, las interacciones entre ellos conducen indefectiblemente a un comportamiento global regular y, por consiguiente, es discernible en el largo plazo. Así, el azar a gran escala produce un comportamiento difícil de distinguir del que se estudia con las herramientas del determinismo. Hay muchos ejemplos para convencernos de ello.

Si se toma una colección de datos equidistantes en el tiempo (una *serie de tiempo*) producida por el mejor algoritmo imaginable que genere números aleatorios, la serie derivada que se obtiene de sumar dos términos consecutivos de la original ya no es azarosa; tiene una estructura de correlaciones bien definida y una regularidad geométrica sorprendente. De la misma manera, si se consideran dos series aleatorias, la que se obtiene mediante la multiplicación término a término, de ellas, presenta regularidades que pueden describirse mediante una ley matemática muy parecida a la función beta.

El azar en el sentido de Laplace, sólo representable mediante una sucesión de números aleatorios, es tan frágil que difícilmente puede existir fuera del mundo de las idealizaciones extremas; por ejemplo, en el nuestro, en donde no hay sistemas aislados. Más aún, a partir del auge en el estudio de los sistemas caóticos ya sabemos que no hay diferencia, mas allá de la semántica, entre azar y caos de alta dimensionalidad. En efecto, la dinámica producida por un sistema dinámico en régimen caótico, normalmente se expresa geoméricamente en el espacio de configuraciones como un *atractor extraño* (Miramontes, 2005), que es un conjunto fractal que contiene los estados compatibles con la dinámica del sistema. Si la dimensión fractal del atractor extraño crece al aumentar la dimensión del espacio euclidiano que lo aloja, entonces no hay manera de distinguir esta dinámica determinista del azar.

Recordemos que el caos es un comportamiento ubicuo en los sistemas deterministas no lineales con la característica, ciertamente asombrosa, de que si bien dada una configuración del sistema en un momento dado, la configuración siguiente está determinada y puede, por lo tanto, calcularse. El sistema encierra inevitablemente comportamientos impredecibles o predecibles con horizontes de predictibilidad finitos.

Las consecuencias epistemológicas de este hecho aún no permean suficientemente a la comunidad científica y todavía hay una enorme confusión en la que ca-

²³ El subrayado es nuestro.

da quien interpreta la teoría de los sistemas dinámicos no lineales (y lo que empieza a llamarse ciencia de la complejidad), según le conviene y acude a argumentos mal formulados y peor defendidos para justificar las propuestas de toda su vida. De hecho, esta tendencia se ha vuelto moda y, aquí y allá, muchos evolucionistas se alejan de la medida de la que Darwin da cátedra en *El origen*.

Léase, por ejemplo, la siguiente formulación de Stephen Jay Gould:²⁴

Asimismo, el análisis matemático de los sistemas complejos –sistemas compuestos de múltiples partes independientes– muestra que una pequeña perturbación puede producir efectos profundos debido a la forma en que se propaga en cascada mediante las interacciones no lineales del sistema. Si, además, añades un poquito de aleatoriedad, tendrás efectos profundos e impredecibles.

No hay que agregar nada, mucho menos algo tan vago como “azar” a un sistema complejo para que éste sea impredecible. Peor aún, tampoco es cierto que no poder predecir implique que el sistema sea ininteligible: un sistema caótico es impredecible pero puede presentar patrones de comportamiento regular y es controlable.

Perderle el respeto al azar, dejar de considerarlo un límite insuperable para el conocimiento, ha permitido sugerir explicaciones ahí donde, hasta la aparición de la ciencia de la complejidad, nadie se había atrevido. En 1993, Octavio Miramontes, Ricard Solé y Brian Goodwin mostraron que un conjunto de osciladores caóticos con reglas de acoplamiento relativamente simples, dan como resultado pautas discernibles de comportamiento global. Con ello, modelaron la conducta de insectos sociales y la conclusión es una paráfrasis experimental, si se nos permite la expresión, de la visión de Gnedenko y Kolmogorov.

En el ámbito de la evolución biológica, dos de nosotros, con algunos colegas de la UNAM (Medrano, Cocho, Miramontes y Rius, 1994), reportamos que las mutaciones en las bases del DNA no son azarosas, sino que la frecuencia de su ocurrencia depende de la intensidad del enlace químico.

A su vez, John Cairns, de la Universidad de Harvard, afirma que:

La mutabilidad del DNA varía enormemente desde un par de bases a otro. Parte de esta variación se debe a la especificidad de la reacción entre mutágeno y base pero mucho de la variación se debe a causas desconocidas.

Cairns va mucho más lejos; implica en sus trabajos que las tasas locales de mutación en el DNA pueden, incluso, ser una respuesta de la célula a presiones ambientales; esto le ha valido una avalancha de ataques y ha hecho que sea prácticamente imposible publicar en este campo.

En resumen, es sencillo darle al azar un papel en los procesos biológicos sin detenerse a reflexionar en la naturaleza del mismo. Si se hiciera, y si se adoptara la prudencia y la medida de Charles Darwin, tendríamos la obligación intelectual de refundar las premisas de nuestras teorías para dar lugar al determinismo que surge de la interacción de componentes de un sistema, aunque cada uno de ellos tenga un alto grado de irregularidad.

²⁴ Gould, Stephen Jay, “The Spice of Life, An Interview with Stephen Jay Gould” en *Leader to Leader*, no. 15, invierno de 2000.

HACIA UNA PROPUESTA RACIONAL Y MATERIALISTA

La rama de la ciencia que se encarga de estudiar, entre otras cosas, la emergencia de patrones, tanto espaciales como del comportamiento, de los procesos con autoorganización y del cómo la sincronización de componentes caóticos puede dar lugar a comportamientos organizados, se llama *teoría de los sistemas complejos*. Es una ciencia que no cae en ningún cajón de la clasificación tradicional de las ciencias, pues su naturaleza profundamente transdisciplinaria (Köppen, Mansilla y Miramontes, 2005) no permite una ubicación fija y estática. La teoría de los sistemas complejos lo mismo participa en estudios de biología que de economía; desde moléculas hasta las sociedades. El avance notable de la teoría matemática de los sistemas dinámicos y de las ciencias de la computación ha permitido un auge notable en el desarrollo de la teoría de los sistemas complejos. El lector interesado puede profundizar en los conceptos y metodología de los sistemas complejos consultando los libros de Ian Stewart (1999; 2002) o un artículo nuestro (Cocho y Miramontes, 2000).

Vivimos una época dominada por el descubrimiento de que la dinámica biológica opera en medio de una multitud de restricciones; esto implica que la otrora todopoderosa selección natural actúa sobre un espacio de posibilidades no sólo limitado, sino constreñido a existir dentro de la estrechez de los estados físicamente viables, en un caso, por la simple interacción colectiva de componentes azarosos o, muy posiblemente, por dinámicas caóticas débiles.

Estas consideraciones configuran un escenario propicio para que la evolución biológica sea materia de estudio de la teoría de los sistemas complejos. Sin ser la panacea universal, dicha teoría nos permitirá zafarnos de camisas de fuerza conceptuales e ideológicas que nos han impedido aceptar que la selección natural es discutible –como todo postulado científico– y que su relevancia en el proceso evolutivo debe ser evaluada.

Como hemos dicho, el azar domesticado por la acción colectiva o caos de alta dimensión son lo mismo. Difícilmente podremos entrar en este universo sin conocer uno de los lenguajes que más articula y mayor sentido le da a la acción humana de comprender el universo. Hablamos de la matemática y nos guardamos *ex profeso* para estos últimos párrafos el homenaje debido al visionario que entendió que el estudio de la biología sin el concurso de la matemática no podría jamás abandonar la descripción narrativa:

Célula y tejido, concha y hueso, hoja y flor no son sino porciones de materia y el movimiento de sus partículas, su modelado y configuración ocurren en obediencia de las leyes físicas. No hay excepciones a la regla: Dios siempre hace geometría y sus problemas para dar forma son, en primera instancia, problemas matemáticos y sus problemas para definir el crecimiento, físicos. El morfólogo es, *ipso facto*, un estudiante de ciencias físicas.

Estas líneas, extraídas de su gran obra *On Growth and Form*,²⁵ nos revelan la

²⁵ Hay que evitar la edición condensada preparada por John T. Bonner para la Cambridge University Press pues los capítulos que se omitieron son los que se refieren a la evolución.

claridad del pensamiento de D'Arcy Wentworth Thompson, zoólogo, clasicista, matemático, pero ante todo un estudiante de la naturaleza en su globalidad.

La aparición, el desarrollo y la historia de los seres orgánicos no es el milagro único e irrepetible que ven los funcionalistas porque (Cocho, 2002):

... la vida no es un artífice inteligente y genial a cuya disposición hay un número infinito de posibilidades para realizar insospechadas obras de arte biológico: al contrario, dispone sólo de un número limitado de herramientas y métodos porque la naturaleza la sujeta a muchas restricciones y debe resolver los problemas como buenamente puede, con los materiales y en las regiones que la constelación de leyes fisicoquímicas le impone.

Además, la misma suerte, lo aleatorio, lo fortuito –otrora *bête noire* a la que se le achacaba la incapacidad de conocer– conspira en favor de que la vida resuelva sus problemas y, vista así, resulte mucho más fácil de comprender de lo que parece a primera vista.

Desde una perspectiva completamente racionalista y sin una sola referencia a una inteligencia superior, el astrofísico británico Fred Hoyle (1915–2001) mostró que la probabilidad de obtener, de una sopa primitiva terrestre,²⁶ “el conjunto de enzimas de la célula más simple” es de uno en $10^{40,000}$ y dado que sólo hay 10^{80} átomos en el universo, aun si el universo entero fuese sopa primitiva, la aparición de una sola célula sería un milagro y, permítasenos conservar nuestro escepticismo y manifestarlo, los milagros no existen.

Años más tarde, Hoyle hizo los cálculos correspondientes para la evolución biótica (Hoyle, 1999) y llegó a conclusiones semejantes: la selección natural, sin restricciones estructurales, gradualista, operando en el universo de las reservas génicas mediante recombinaciones, mutaciones e interacción selectiva azarosa con el medio, es decir, la selección natural de la propuesta neodarwiniana, no alcanza para explicar el origen de la vida ni su historia en la Tierra.

Los cálculos de Hoyle son correctos pero están basados en la premisa falsa de que la evolución biológica es el resultado del azar. Este es el tipo de ejemplo favorito de los creacionistas que emplean para, según ellos, rebatir la evolución biológica.

Bien haría la comunidad biológica en hacer el esfuerzo de comprender los fenómenos de emergencia y autoorganización, de estudiar exactamente qué se quiere decir con “aleatorio” o “azaroso” y de dar a la física el papel, que le ha regateado por mucho tiempo, de ser el filtro esencial que separa lo viable de lo imaginable y que prepara el escenario para que otros mecanismos –entre ellos, la selección natural– hagan la parte que les toca en el maravilloso proceso de la evolución.

COLOFÓN

En este trabajo hemos mostrado que mecanismos asociados a las restricciones termodinámicas y estructurales de los polímeros biológicos, a la estructura modular

²⁶ Confr. “Rejection of Chemical Evolution” en http://en.wikipedia.org/wiki/Fred_Hoyle

de los organismos vivos, a la presencia de mecanismos genéricos morfogénéticos de ruptura de la simetría y al carácter fuertemente determinista de la coincidencia de varios mecanismos estocásticos, la selección natural externa tiene un rango de acción fuertemente restringido, pudiendo así jugar un papel importante en la evolución de los organismos biológicos.

Todo esto hace suponer que hay lugar para el optimismo en lo referente a la comprensión futura de la evolución biológica y que más pronto que tarde tendrá lugar una nueva síntesis que desplace de modo definitivo al creacionismo, sea con este nombre, sea con el de diseño inteligente o bajo cualquier otro disfraz.

BIBLIOGRAFÍA

- Cocho, G. y P. Miramontes. 2000. "Patrones y procesos en la naturaleza. La importancia de los protectorados". *Ciencias*, 59, julio-septiembre:12-20.
- Cocho, Germinal. 2002. "Ernst Mayr, la teoría sintética de la evolución natural y una nueva visión del azar y la necesidad". En Sánchez Garduño, F., P. Miramontes y J. L. Gutiérrez (coords.), *Clásicos de la biología matemática*. México: CEIICH-UNAM / Siglo XXI, pp.11-21.
- Cronin, Helena. 1992. *The Ant and the Peacock: Altruism and Sexual Selection from Darwin to Today*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Dawkins, Richard. 1986. *The Blind Watchmaker: Why Evidence of Evolution Reveals a Universe Without Design*. Nueva York: W. W. Norton & Company.
- Dawkins, Richard. 1989. *The Selfish Gene*. Nueva York: Oxford University Press.
- de Duve, Ch. 1996. "The Constraints of Chance". *Scientific American*, enero.
- Douady, A. and Y. Couder. 1996. "Phyllotaxis as a Dynamical Self Organizing Process" (Part I, II, III). *J. Theor. Biol.*, 139:178-312.
- Eddington, A. 1948. *The Nature of the Physical World*. Nueva York: Macmillan.
- Foster, P. L., E. Eisenstadt & J. Cairns. 1982. "Random components in mutagenesis", *Nature*, 299:365-367, (23 de septiembre de 1982).
- Gnedenko, B. V. y A. N. Kolmogorov. 1968. *Limit Distributions for Sums of Independent Variables*. Second edition (traducido del ruso, anotado y revisado por K. L. Chung, con apéndices de J. L. Dobb y P. L. Hsu). Addison Wesley.
- Gould, S. J. 1994. "The Evolution of Life on the Earth". *Scientific American*, octubre: 84-91.
- Gould, S. J. 2002. *The Structure of Evolutionary Theory*. Harvard University Press.
- Gutiérrez Sánchez, J. L. 2002. "Waddington, Thom y la biología teórica". En Sánchez Garduño, F., P. Miramontes y J. L. Gutiérrez (coords.), *Clásicos de la biología matemática*. México: CEIICH-UNAM / Siglo XXI, pp.22-46.
- Hoyle, F. 1999. *Mathematics of Evolution*. Memphis: Acorn Interprises.
- Kauffman, Stuart A. 1993. *The Origins of Order. Self-Organization and Selection in Evolution*. Nueva York: Oxford University Press.
- Kondepudi, D. K. and I. Prigogine. 1998. *Modern Thermodynamics: From Heat Engines to Dissipative Structures*. John Wiley & Sons.
- Köppen, E., R. Mansilla y P. Miramontes. 2005. "La interdisciplina desde la teoría de los sistemas complejos". *Ciencias*, 79, julio-septiembre:4-12.
- Kuhn, Thomas. 1999. *La estructura de las revoluciones científicas*. México: Fondo de Cultura Económica.

- Lem, Stanislaw. 1981. Reseña del libro apócrifo de Cezar Kouska *De imposibilitate vitae, de impossibilitate prognoscendi* en *Vacío perfecto*. Barcelona: Bruguera, pp.163–188.
- Medrano, L., G. Cocho, P. Miramontes y J. L. Rius. 1994. "DNA Stability, Base Substitution and Sequence Evolution". *Evolutionary Theory*, (10):249–258.
- Meinhardt H. 2003. "Complex pattern formation by a self-destabilization of established patterns: chemotactic orientation and phyllotaxis as examples". *C R Biol*, 326(2):223–37.
- Miramontes, O., R. Solé and B. Goodwin. 1993. "Collective Behaviour of Random-activated Mobile Cellular Automata". *Physica D* 63:145–160.
- Miramontes, P. y J. L. Gutiérrez. 1998. "¿Podemos explicar las formas vivas? Una flor para Fibonacci". *Especies*, vol. 7, no. 4, septiembre-octubre.
- Miramontes, P. y J. L. Gutiérrez. 2002. "El origen de las formas vivas, de Geoffroy Saint-Hilaire a D'Arcy Thompson". En Sánchez G., F., P. Miramontes y J. L. Gutiérrez (coords.), *Clásicos de la biología matemática*. México: CEIICH-UNAM / Siglo XXI, pp.47–66.
- Miramontes, P. 2005. "El tiempo desde los sistemas dinámicos". En Valencia García, G. y M. E. Olivera Córdova (coords.), *Tiempo y espacio: Miradas múltiples*. México: CEIICH-UNAM / Plaza y Valdés.
- Morris, Richard. 2001. *The Evolutionists. The Struggle for Darwin's Soul*. Nueva York: W. H. Freeman.
- Ramírez, Santiago (coord.). 1999. *Perspectivas en las teorías de sistemas*. México: CEIICH-UNAM / Siglo XXI Editores.
- Stewart, I. 1999. *Life's Other Secret: The New Mathematics of the Living World*. John Wiley and Sons.
- Stewart, I. 2002. *Does God play dice?: The New Mathematics of Chaos*. Blackwell Publishers.
- Thompson, D. W. 1992. *On Growth and Form*. Dover Publications.
- Turcotte, D. L. and J. B. Rundle. 2002. "Self-Organized Complexity in the Physical, Biological, and Social Sciences. *Proc Natl Acad Sci*. Feb 19;99 Suppl 1:2463-2465.
- Waddington, Conrad Hal. 1977. *Tools for Thought. How to Understand and Apply the Last Scientific Techniques of Problem Solving*. Nueva York: Perseus Books.

⊙ *Esta es una página en blanco.* ⊙

CIENCIA Y HUMANISMO, CAPACIDAD CREADORA Y ENAJENACIÓN*

I. DEL IMPERIALISMO DE LA FÍSICA

DESDE finales del Renacimiento, la reina de las ciencias ha sido la física. A semejanza de Napoleón en Nôtre Dame, los físicos tomaron la corona, la colocaron sobre sus cabezas y proclamaron a su disciplina como el modelo para el estudio de la naturaleza. Las leyes de la física son generales; sus teorías, sólidas; su formulación matemática, robusta y elegante. Con base en unos cuantos principios primordiales, sus métodos permiten predecir el comportamiento de la materia en un rango que cubre desde lo inconcebiblemente pequeño, la escala de Planck, hasta las pasmosas magnitudes de los objetos cósmicos. Además de que éstas son razones suficientes para aceptar que la corona está bien puesta, la revolución intelectual racionalista había librado, para beneficio del intelecto humano, las grandes batallas que legitimaron la coronación.

Luego de que la humanidad buscara durante miles de años explicaciones para todo en la voluntad divina, los pensadores del seiscientos deciden dejar a Dios en el fondo, convertirlo en parte del paisaje ideológico y volverse hacia sí mismos. Abrevando en las grandes corrientes del pensamiento griego, recuperan la confianza en su aptitud para comprender y transformar el mundo. Entre el descubrimiento galileano de las lunas de Júpiter y esa “vasta inteligencia” de Laplace –capaz de conocer el estado de todas las partículas del universo y, mediante las leyes de Newton, calcular su evolución presente, pasada y futura– hay doscientos años en los que crece la certeza de que el universo obedece leyes naturales y de que la razón, atributo máximo de nuestra especie, es capaz de descubrirlas y aprovecharlas en beneficio propio.

Esta certidumbre trastorna al mundo en todos sus aspectos; en fase con las aspiraciones de la burguesía emergente, pronta a tomarse el poder político sobre las ruinas de las instituciones feudales, el culto a la razón sustituye al de la divinidad e influye cada aspecto de la vida. Hechos a un lado los prejuicios teológicos

* Ensayo escrito por Germinal Cocho, José Luis Gutiérrez y Pedro Miramontes. Es una versión en español del ensayo “Ciência e humanismo, capacidade criadora e alienação”, publicado en: De Sousa Santos, B. (ed.), 2003. *Conhecimento prudente para uma vida decente: ‘Um discurso sobre as ciências’ revisitado*. Porto: Edições Afrontamento; reimpresso en Brasil por Cortez Editora, São Paulo.

y metafísicos de la Edad Media, todo el conocimiento habría de ser reconstruido sobre bases distintas.

Hasta entonces, las supersticiones habían hallado en la ignorancia su mejor caldo de cultivo y habían propiciado que el poder político, anclado y confundido con el de las jerarquías religiosas, avasallara a los individuos y los sometiera a los peores excesos: sobre la base del miedo generalizado a lo sobrenatural, mediante auténticos crímenes contra la humanidad, el aparato de poder había creado un estado de terror para someter a la gente.

La exaltación de la razón por encima de los dogmas y su implacable ejercicio crítico fueron un fermento subversivo cuya acción dio lugar a una revolución de las conciencias y produjo el racionalismo como doctrina filosófica y como actitud ante la vida; ambas se levantaron sobre tres principios explicativos generales:

- El *materialista*: hay un mundo real, independiente de la percepción de los seres humanos; un mundo con cualidades esenciales, un universo que puede *reducirse*, en última instancia, a *materia*.
- El *mecanicista*: todo lo que sucede ocurre merced a fuerzas que operan sobre los cuerpos y producen movimiento. El espacio y el tiempo son absolutos.
- El *determinista*: dado el supuesto anterior, como la maquinaria no puede desobedecer las leyes que la rigen, todo en el universo está determinado, independientemente de si puede o no calcularse.

En su lucha contra el antiguo régimen, la burguesía se adueñó del discurso racionalista para minar las bases de la estructura feudal y, una vez en el poder, lo utilizó para perpetuarse en él exacerbando las consecuencias de sus principios generales (los defensores contemporáneos del sistema hegemónico de nuestros días sólo han refinado los mismos argumentos): desde la interpretación espuria de los capitalistas, en la dinámica social las mercancías importan más que los seres humanos y el máximo valor es la ganancia; los flujos de dinero y las leyes del comercio determinan el destino de hombres y mujeres: los convierten en el vehículo mediante el cual las mercancías garantizan la producción de más mercancías. Así, la burguesía conservadora sustituye la voluntad de Dios por la ley de los mercados.

Como tantas veces en la historia, la clase revolucionaria impulsa primero el cambio, le da legitimidad y lo abandera; después, lo detiene y lo traiciona. De su programa original, purga las componentes revolucionarias, ahora subversivas, para luego evitar más cambios, echando mano de todo lo que esté a su alcance con tal de perpetuarse en el poder.

Así, el racionalismo, enajenado a su favor por los nuevos dueños del mundo, se aplicó entonces a postular normas para todo: desde el arte hasta la vida íntima de las personas; su potencia liberadora fue encauzada para evitar que pudiera servir como instrumento en contra del orden establecido, del mismo modo en que había contribuido a socavar la autoridad de la Iglesia y la monarquía. Surge entonces una nueva casta sacerdotal, la de los científicos.

La formación típica de un científico demanda, con frecuencia, dejar fuera cualquier preocupación ajena a los propios estudios; así, recibe un entrenamiento intenso mediante el cual aprende a investigar en su campo con la mayor eficiencia posible; su visión del mundo se restringe conforme acumula distinciones y grados académicos y, finalmente, llega a dominar el estado del arte en su rama de especialización sin enterarse de otra cosa. Es así como mejor sirve al sistema.

Este proceso reduce tanto la mira del científico que, como los monjes, sólo ve al mundo desde la estrechez de la ventana de su celda. Por ello, Thomas Kuhn ha dicho que nadie puede ser más parecido a un teólogo medieval, a un padre de la santa madre iglesia, que un doctor en ciencias. Además, la actitud pontifical es la misma, su visión del mundo y sus opiniones devienen dogmas; son los ministros de la nueva religión, tienen el reconocimiento social garantizado, se incorporan a los organismos del poder constituido y, consciente o inconscientemente, suelen extrapolar los métodos del reduccionismo para dar soporte ideológico al *statu quo* sin tomar en cuenta las limitaciones de su herramienta conceptual.

Preguntemos ahora si éste es el camino correcto hacia la comprensión del mundo y preguntemos también, con más énfasis, si la pretensión de la de la física imperialista es correcta y debe seguirse su ejemplo al estudiar la realidad social y las distintas expresiones del espíritu humano. Desde nuestra perspectiva, y desde la de los físicos Goldenfeld y Kadanoff la respuesta es negativa:

Las ideas que constituyen los cimientos de nuestra visión del mundo son en verdad bastante simples: el mundo respeta las leyes y éstas rigen dondequiera. Todo es simple, diáfano y se puede expresar en términos matemáticos, ya sea mediante ecuaciones diferenciales parciales u ordinarias... Todo es simple y diáfano, excepto, desde luego, el mundo. (Goldenfeld y Kadanoff, 1999: 87)

¿Qué hacer entonces? Queda claro que los intentos de interpretar los procesos humanos –desde la conciencia de los individuos hasta la historia o la evolución cultural de los pueblos– con la herramienta del reduccionismo mecanicista son un despropósito y empeñarse en defender su validez, una necesidad. El porqué es simple: hasta el último tercio del siglo XX, la física se había construido con base en postulados simplificadores sin posibilidad de analogías válidas en un mundo característicamente complejo.

II. LA MATEMÁTICA DEL MUNDO DEL MAÑANA

Para abordar la complejidad del mundo implícita en la cita de Goldenfeld y Kadanoff, disponemos de los avances de la física teórica contemporánea y de su herramienta, lenguaje y método: la matemática. Aquí es necesario despejar algunas dudas y aclarar una serie de confusiones muy difundidas acerca de la esencia de la misma.

Medir es una de las operaciones más primarias para relacionar la realidad física con el mundo de abstracciones que forman el universo matemático, pero restringir los alcances de esta ciencia a la búsqueda del rigor en las mediciones corresponde

a la visión positivista baconiana según la cual sólo lo que puede registrarse empíricamente (i. e., medirse) puede conocerse.

Ni siquiera en el trabajo galileano medir tuvo tal importancia y cuando a Einstein se le preguntaba por “su laboratorio”, mostraba orgulloso la estilográfica en el bolsillo de la camisa: las grandes teorías de la ciencia se han construido sobre bases matemáticas, sí, pero eso no tiene que ver con la pretensión de exactitud en las mediciones sino con las posibilidades de plantear hipótesis sobre cómo ocurre algo en la naturaleza, deducir las consecuencias en el ámbito de los formalismos matemáticos y confrontar las consecuencias con lo que realmente sucede (en donde, posiblemente, el medir cobre importancia) para refutar o no las hipótesis. Esa es la gran lección de Galileo y hoy, como hace trescientos cincuenta años, sigue vigente:

Matematizar una disciplina es... penetrar los objetos de estudio con las herramientas para el pensamiento que nos da la matemática, es buscar en ellos lo esencial y acotar lo contingente, es aprender a reconocer las relaciones estructurales o dinámicas entre sus diversos elementos para deducir lo que no es evidente. (Gutiérrez, 1999: 93)

En efecto, la matemática no es una colección de técnicas para medir y contar; su éxito como lenguaje de la ciencia está directamente vinculado con su capacidad inagotable para descubrir pautas y estructuras en donde la observación directa y la estadística –justificadora de prácticamente cualquier cosa– sólo puede acumular datos. De hecho, la estadística es el opuesto metodológico de las grandes construcciones teóricas, en particular de los sistemas como instrumentos para conocer el mundo, en los que se hace un corte para considerar las cosas como separadas y para volver a presentarlas, ya no como cosas solamente sino como cosas interrelacionadas.

La exigencia de medir con exactitud es, indudablemente, importante en la tecnología pero, ni así, puede verse como un elemento del método de la ciencia (ni de la tradicional ni de la emergente). En cambio, es parte del discurso pseudorracionalista del aparato de poder: algunas verdades a medias, una pila de prejuicios y otra de intenciones políticas, han servido de base para querer cubrir de “cientificidad” afirmaciones insostenibles. No obstante, ese tipo de argumentaciones gozan de un reconocimiento social muy alto en algunos círculos científicos, sociedades y escuelas de la clase sacerdotal. Si un reporte de investigación no lleva pruebas de chi cuadrada o regresiones múltiples, podrá ser devuelto por los árbitros con un lacónico comentario acerca de su falta de objetividad o, peor aún, descalificándolo por poco científico.

La sobrevaloración de los métodos estadísticos es útil en la conservación del poder, lo mismo en los comités que aprueban programas de investigación que en las esferas de la política de los estados: recurriendo a los “datos duros” de la macroeconomía, por ejemplo, los tecnócratas venden la idea de bonanza económica mientras la gente común se muere de hambre. Pero, insistimos, nada de esto tiene que ver con el papel de la matemática en la ciencia.

III. SOBRE LA CRISIS DEL PARADIGMA DOMINANTE

En la escala astronómica, el tiempo y el espacio newtonianos fueron relativizados por Einstein y, en la atómica, fue necesario inventar la mecánica cuántica, ese “acto de desesperación” de Planck, para explicar la radiación del cuerpo negro. Pero no por eso las leyes de Newton dejaron de ser leyes ni por ello se desmoronó la física clásica. Rige, como el monarca de *El Principito*, exactamente donde y como le corresponde hacerlo si bien, siguiendo con el símil, sus dominios alcancen sólo una parcela de la realidad.

Con convulsiones periódicas, la matemática ha avanzado a lo largo de dos mil quinientos años a base de coraje: los pitagóricos vieron cómo se venía abajo la ilusión mística de la conmensurabilidad de dos magnitudes cualesquiera; Herón de Alejandría y, siglos después, Girolamo Cardano, descubrieron un número cuyo cuadrado es menos uno (la raíz imaginaria pura); Galois probó que es imposible resolver por radicales la ecuación general de quinto grado; Pierre Laurent Wantzel y Ferdinand von Lindemann demostraron la imposibilidad de cuadrar el círculo, duplicar el cubo y trisectar el ángulo usando sólo regla y compás; Riemann y Lobatchevski construyeron geometrías que desafiaban la intuición alterando el quinto postulado de la geometría euclídeana; Cantor probó que el infinito no es único sino que se puede formar una cadena infinita en la que el infinito de cada eslabón es más grande que el del anterior; Poincaré echó por tierra la ilusión de Laplace al descubrir que el determinismo de las leyes de Newton implica, bajo ciertas condiciones, una impredecibilidad esencial. . . cada ejemplo significó una crisis en el pensamiento matemático y, de cada una, la matemática salió fortalecida.

El teorema de Gödel merece ser considerado aparte: luego de casi un siglo de esfuerzos por establecer un conjunto de axiomas que le dieran a toda la matemática una base rigurosa, este matemático probó en 1931 que *en cualquier sistema lógico-formal, siempre hay una proposición indecidible, es decir, una proposición del sistema que no puede demostrarse a partir de los postulados iniciales*, de manera que no se puede garantizar que el mismo sistema no implique una contradicción.

Curiosamente, Gödel prueba su resultado dentro de un sistema formal y es válido porque el aparato lógico-matemático que lo sustenta es esencialmente robusto; no importa el oscuro recoveco de ese sistema en el cual se oculte el indecidible, el teorema es verdadero y porque lo es, el indecidible existe.

No hay una relación directa entre el teorema de Gödel y las capacidades de la matemática para comprender el mundo ni se deducen de él límites insalvables; de hecho, la ciencia ha crecido matematizándose y, en dos mil quinientos años de historia matemática, cada uno de sus grandes subsistemas –desde la geometría euclídeana hasta la topología o la teoría de las probabilidades– ha sido construido sin haberse encontrado nunca una contradicción en el cuerpo axiomático y, si acaso se llegase a encontrar un indecidible, se puede siempre agregar al mismo cuerpo y la barrera, si acaso cabe llamarla así, se echa siempre más y más atrás. Por esto, como el *Libro de Arena* de Borges o la cadena de conjuntos de cardinalidad transfinita de Cantor, la matemática en sí misma es inagotable. Gödel encontró que no

son imposibles las inconsistencias en los cuerpos axiomáticos, pero, al descubrir sus limitaciones, dio también una prueba de la grandeza de la matemática, no de su debilidad.

Cabe entonces preguntarse, si el instrumental matemático ha sido hasta hoy la mejor herramienta de la física, pero la extensión del método reduccionista –de utilidad innegable– es notoriamente insuficiente para comprender procesos de sistemas colectivos cuyas propiedades no pueden explicarse como el resultado de sumar comportamientos parciales, ¿hay una física y una matemática adecuadas para esta clase de sistemas? Las hay, se llaman física de los sistemas complejos y matemática de los sistemas dinámicos no lineales.

En *Un discurso sobre las ciencias*, Boaventura de Sousa ubica correctamente la visión del mundo derivada de ellas y desarrollada intensamente en el último tercio del siglo XX, como un agente primordial de la crisis del paradigma científico dominante:

La cuarta condición teórica de la crisis... proviene de los avances del conocimiento en microfísica, química y biología durante los últimos veinte años. Permítaseme citar, a manera de ejemplo, los descubrimientos de Ilya Prigogine. Su teoría de las estructuras disipativas y su principio del "orden mediante fluctuaciones" estableció que, en los sistemas que funcionan lejos del equilibrio, la evolución se explica por fluctuaciones de energía que, en ciertos momentos no completamente predecibles, espontáneamente generan reacciones que, a su vez, mediante mecanismos no lineales, presionan al sistema más allá de su máximo límite de desequilibrio. La situación de bifurcación, es decir, el punto crítico en el cual la mínima fluctuación puede llevar a un nuevo estado, representa la potencialidad de los sistemas para ser atraídos hacia un nuevo estado de menor entropía. De este modo, la irreversibilidad de los sistemas abiertos significa que son producto de su historia. (De Sousa, 1992: 24–25)

En efecto, frente la visión del mundo del mecanicismo reduccionista, estrechamente enfocado a una sola disciplina en alcances y aplicaciones (coto de una parte de la clase científica sacerdotal), la visión de los sistemas complejos provee una teoría transdisciplinaria e integradora, cualitativa y dialéctica; capaz de trascender *el estudio de las partes* para convertirse en un aparato para estudiar *la integración de las partes* en la cual lo más importante es comprender las *propiedades emergentes* como resultado de la interacción, en un sistema de elementos relativamente simples, de un comportamiento colectivo diferente del que presentan por separado los elementos del sistema.

Y lo más notable es que, como la teoría de la relatividad, la física cuántica y el teorema de Gödel, esta nueva visión del mundo es también una consecuencia de lo que hemos llamado el "implacable ejercicio crítico" de la razón; en particular, es el resultado de una profunda aplicación de la matemática, uno de sus instrumentos más agudos. Así, el racionalismo sigue siendo el mejor instrumental que el ser humano ha construido para reflexionar sobre sí mismo y su entorno.

IV. LA REACCIÓN

A finales del XVIII, el movimiento romántico encabezaría la reacción contra las tendencias uniformadoras del racionalismo neoclásico: del programa original de la revolución burguesa tomó la bandera de la libertad, exaltó al Yo y rechazó la posibilidad de explicar la naturaleza de manera única: sólo es posible que cada individuo la perciba intuitivamente y, en el intento por conocerla, prevalecen lo subjetivo, lo irracional y lo imaginativo.

En la *Naturphilosophie*, Johann G. Fichte y Frederick von Schelling, entre otros, dan cuerpo a una teoría del conocimiento consonante con aquellas tesis: a los postulados del materialismo oponen un principio de unidad entre naturaleza y espíritu humano; éste, libre y eterno, escapa al grosero determinismo mecanicista; es preciso estudiar sus manifestaciones superiores, lo subconsciente, lo sentimental y lo místico.

Desde entonces, y hasta el presente, la actitud ante la ciencia se ha movido entre distintas formas de racionalismo y romanticismo: desde la confianza o la veneración complacientes, en un extremo de las oscilaciones, al rechazo total y la añoranza por un pasado míticamente ubicado en una era anterior a la Edad de la Razón, en el otro. Se mueve aún entre el culto al sistema de producción científica y tecnológica sin contexto –es decir, sin ubicar sus tendencias hegemónicas como resultado de la dirección impuesta por el aparato del poder económico dominante de nuestros días– y las posiciones de no pocos intelectuales que, en su ataque ciego a la ciencia, han hecho que vuelva por sus fueros la creencia en lo sobrenatural, en supersticiones y mitos cuya difusión, caldo de cultivo de la ignorancia, sólo puede servir al mismo aparato. Triste es la dicotomía: la *razón ajena a las emociones contra el sentimiento resuelto en misticismo*.

El pensamiento occidental se ha desarrollado, quizá desde la Revolución Francesa, en medio de un conflicto entre las ciencias y las humanidades. Estamos convencidos de que, si lo que nos importa es la gente y no las mercancías, es necesario potenciar la capacidad creadora de los seres humanos sobre la enajenación del sistema en favor de la economía de mercado. Esto pasa por resolver aquel conflicto. Hoy, por vez primera, empiezan a tenderse puentes para superar las diferencias pero también es hoy cuando la crítica neurótica al racionalismo gana más adeptos.

Puede ser que nos haya tocado vivir una de esas etapas de cambio rápido en la historia de las ideas en las que todo puede suceder.

Nuestra responsabilidad como intelectuales no puede ser más grande: debemos contribuir, desde ambas riberas, a la construcción de esos puentes. El primer paso para hacerlo es, desde luego, evitar las actitudes arrogantes e identificar nuestras limitaciones. Antes de discutir cómo hacerlo, para allegarnos elementos de juicio y poder deducir una estrategia adecuada, es preciso referirnos a nuestro contexto histórico y a las tendencias que, en el mundo de hoy, pueden contribuir u obstaculizar el intento.

V. EL MUNDO HOY: CAMBIO RÁPIDO,
REVOLUCIÓN PERMANENTE Y OBSOLESCENCIA

En la última década del siglo XX el mundo experimentó cambios profundos asociados con el fin de la era geopolítica bipolar: la caída de la Unión Soviética y el desmoronamiento del llamado “bloque socialista” condujeron al dominio absoluto, sin contrapesos, de la escena política y económica mundial por parte de los Estados Unidos de América y su capitalismo salvaje. El tránsito al mundo unipolar, lejos de aliviar las tensiones características de la *guerra fría*, trajo consigo relaciones aberrantes entre naciones, sociedades e individuos. El mundo se encuentra inmerso en una crisis generalizada y la metrópoli imperial hace de la guerra el método para resolver los conflictos. El terrorismo no es sólo la acción desesperada de grupos extremistas minoritarios o fanáticos que desafían al poder constituido; es también, y con alcances destructivos muy superiores a los de su contraparte, la violencia sistemática contra pueblos enteros ejercida por los estados, como Israel y Estados Unidos, con el poder suficiente para hacerlo de manera impune.

Las personas viven bajo la presión sostenida de estar obligadas a ocuparse primero y casi exclusivamente por sobrevivir; por esto, la gente se encierra en sí misma y busca salidas individuales a sus problemas cotidianos. El trabajo enajenante despoja a grupos enormes de seres humanos de toda posibilidad de reflexión y educación intelectual; el desempleo, a su vez, las encadena a otra sumisión: la de la búsqueda cotidianamente incierta de los medios de sustento. Por ejemplo, en el Occidente pobre, la mujer sale de su casa al trabajo no por haberse liberado de la tradición opresiva que la confina al hogar y la somete al hombre, sino por la precariedad del ingreso familiar y la necesidad de asegurar su propia subsistencia y la de los suyos.

La sabiduría y el conocimiento son riqueza de otro tipo y, en relación con ella, se repite el patrón impuesto por el sistema en todo lo demás: “los que saben” son unos cuantos, los que tienen la posibilidad de beneficiarse del bien social que es la ciencia, son menos aún. La ignorancia cubre como un velo espeso a las mayorías a quienes les ha sido escamoteado el derecho a desarrollarse intelectualmente. El abismo es, generación tras generación, cada vez más profundo y no se vislumbra una solución pues, para empezar, ni siquiera existe conciencia del problema.

Los cambios políticos globales del último tercio del siglo XX tuvieron, sobre todo en los países del Tercer Mundo, contrapartes domésticas igualmente dramáticas. La formación universitaria, sobre todo la relacionada con las ciencias y las humanidades, perdió su valor. Hoy, muchos de quienes podrían ser profesores e investigadores deben, por menester, emplearse en trabajos ajenos a los de su orientación profesional y, cada vez más, los aparatos estatales prefieren importar conocimiento desde los grandes centros de producción científica y tecnológica del mundo a impulsar un desarrollo propio.

Esas aberraciones han provocado una disminución de la creatividad global en la sociedad y, notoriamente, de la libertad individual. Por una parte, los medios de comunicación masiva se arrogan el papel de educadores ante el abandono delibe-

rado de las tareas educativas por parte de los estados del capitalismo, maduro o dependiente, y saturan el éter de entretenimiento banal y de violencia: los horrores de la guerra forman ya parte de la distracción de las familias en sus horas de descanso: impúdicamente, los noticiarios de la televisión y la radio los difunden y hace mucho tiempo que la gente empezó a creer que ése –el de las Torres Gemelas hechas polvo en Nueva York, el del Consejo de Seguridad de las Naciones Unidas doblegándose una y otra vez ante la locura belicista del gobierno estadounidense– es el estado normal de las cosas y que no pueden, por lo tanto, ser de otra manera.

VI. ¿DESALIENTO O ESPERANZA?

La desesperanza conduce a la búsqueda de soluciones personales inmediatas y por ello las mayorías se vuelcan hacia el misticismo y se refugian en la religión; reaparece el pensamiento mágico: la influencia de adivinos, predicadores y chamanes es cada vez mayor; ante la total indiferencia de las autoridades educativas y sanitarias, tienen acceso sin restricciones a los medios de comunicación y –dado el deterioro del sistema público de salud y lo inaccesible que es la atención médica privada para el pueblo– la gente les confía su salud física y emocional a todo tipo de charlatanes; asimismo, cree a pies juntillas sus pronósticos y orienta su vida según sus recomendaciones. Como una reacción ante los males que los aquejan (muchos de los cuales, en la imaginación popular, son fruto de la razón y la ciencia) los seres humanos de principios del tercer milenio, han vuelto a la superchería como solución última y confiable.

Y sin embargo, nunca en la historia hubo mayores posibilidades de acceder a la información y de educarse –usando los medios que la tecnología de las comunicaciones pone al alcance– que en nuestros días. Uno de los frentes de conflicto más agudo es el del control de esos medios: por un lado, se han convertido en las nuevas ruedas del comercio y la actividad financiera sobre las cuales el capitalismo medra e impone sus leyes; por otro, con ánimo académico o sin él, cualquier persona puede sumergirse en la Internet –si bien el que no todos tengan acceso es, hoy en día, un elemento más de las desigualdades que son raíz y fruto del capitalismo– y tener contacto con el conocimiento científico y el saber humanista de nuestros días: ahí se tiene acceso a bancos inmensos de datos y es posible ponerse al día en los avances de investigación de cualquier tema, confrontar tesis o ensayos, defender y difundir movimientos u opiniones sociales contrahegemónicos, etcétera.

El control de la información y del conocimiento es un instrumento de dominación pero también puede ser un elemento liberador si se actúa con ingenio y creatividad. En nuestros días, el cambio en todos los órdenes de la vida es más rápido que nunca: la sociedad capitalista tiene una altísima tasa de obsolescencia de la producción –piénsese, por ejemplo, en la vida útil de un programa para computadora– y la cantidad de información disponible crece exponencialmente día a día, mientras los nodos en la red electrónica mundial se multiplican con velocidad similar. Estos son indicios de inestabilidad estructural y sugieren un estado de crisis. Los nuestros son tiempos que ofrecen una coyuntura extraordinaria para

cambiar. Ante la embestida por el control de la conciencia de la gente, se abre la posibilidad de aprovechar el cambio rápido e impulsar una suerte de revolución permanente. Esto requiere una estrategia adecuada para contrarrestar la obsolescencia y saber estar al día a pesar de la rapidez con la que el conocimiento “de punta” se va sustituyendo: de otro modo, el sistema dominante siempre tendrá la posibilidad de imponer la enajenación sobre la capacidad creadora.

A mediados de la década de los setenta del siglo pasado, el embriólogo británico Conrad Hal Waddington –uno de los científicos y filósofos de la ciencia más destacados de la época– sostenía que la tasa de obsolescencia era tan alta, que bastaba con que transcurrieran “unos cuantos años para que una parte considerable (superior al 60% en algunos campos) de la reserva de conocimientos de la mayoría de la gente perdiera su vigencia” y proponía las siguientes medidas educativas para atender el problema:

... Presumiblemente, la solución consiste en enseñar (a) principios generales que se hagan obsoletos sólo muy lentamente; (b) métodos de investigación que permitan encontrar rápida y correctamente, información factual actualizada para poner carne sobre aquellos huesos [los de los principios generales. . .] cuando sea necesario a fin de aplicar; (c) métodos de clasificación de la información que establezcan una jerarquización en categorías de manera que los asuntos importantes para un contexto particular, puedan destacarse rápidamente y (d) el inculcar el deseo de continuar autoeducándose luego de que el periodo de educación formal haya terminado. . . (Waddington, 1977: 36-37)

Poner en práctica una educación basada en estos principios, apoyados en las facilidades de acceso y procesamiento de la información de nuestros días, puede ser fundamental si queremos convertirnos en agentes de transformación del mundo; conscientes de nuestro papel como científicos o humanistas, capaces de defender, ejerciéndola, nuestra capacidad creadora.

VII. LAS CULPAS

Empero, es preciso volver al conflicto entre ciencias y humanidades descrito arriba; en particular, importa deslindar la crítica neurótica de la ciencia de los cuestionamientos válidos. Conviene hacerlo porque aquella crítica es la base de la tendencia retrógrada que alimenta la vuelta a las supersticiones y el pensamiento mágico (ubicado aquí bajo el nombre genérico de corriente *new age*), preludio de la nueva Edad Media anticipada hace más de una década por Umberto Eco. Mayor importancia tiene el deslinde si se toma en cuenta el hecho de que muchos intelectuales progresistas, humanistas destacados y científicos comprometidos con la gente, se han dejado llevar por el espejismo de algunas corrientes, cercanas al postmodernismo y el relativismo cultural, de moda en las metrópolis y cuyas posiciones se inspiran en lo *new age* o, en el mejor de los casos, lo rondan de muy cerca. El racionalismo y la ciencia están hoy en el banquillo de los acusados. Un poeta, notable por su actuación política, expresa su punto de vista de la siguiente manera:

La caída del comunismo se puede interpretar como una señal de que el pensamiento moderno –basado en la premisa de que el mundo es discernible objetivamente y que el conocimiento así adquirido es susceptible de generalización– ha caído en una crisis final. (Václav Havel, “El fin de la era moderna”, *The New York Times*, 1 de marzo de 1992)

En este enunciado se resume con claridad meridiana la confusión inmensa sobre la cual se basa la acusación: Havel es incapaz de distinguir el campo semántico de sus animadversiones políticas del correspondiente a una teoría del conocimiento. Identificar el comunismo con la burocracia soviética es un grosero disparate difundido hasta el cansancio por los medios de comunicación masiva: que Havel lo repita es propio de su talante ideológico; pero es peor aún el intento de justificar así la tesis de que el mundo no es discernible objetivamente a partir de una premisa falsa y sin relación con lo que se quiere inferir de ella.

Desde luego que el Universo se puede discernir objetivamente y el conocimiento adquirido en ese empeño intelectual es susceptible de generalización. No otra cosa se ha hecho en la ciencia durante los cuatrocientos años de su existencia; negarlo es una muestra o de máxima ignorancia o de pésima intención. Nos preguntamos si Havel y quienes comparten su opinión podrían sostener lo que dicen cuando viajan en avión, cuando usan un dispositivo láser o cuando vacunan a sus hijos. El que este tipo de afirmaciones pueda tener foro es también responsabilidad del sistema que hizo de algunos científicos una clase sacerdotal. Pero la ciencia es un bien social –cada descubrimiento ha sido financiado indirectamente por el trabajo de la gente común, mal que le pese al poder financiero– y debe estar al alcance de todos. Cada esfuerzo por explicar lo que es la ciencia, su historia, métodos y problemas es benéfico para la sociedad, cada denuncia acerca de los peligros de la pseudociencia, un servicio a la civilización. Una sociedad de gente informada y crítica es una sociedad más libre y justa. La ignorancia, como en la larga noche medieval, sólo favorece a la dominación.

Pero sería una necesidad cerrar los ojos ante críticas legítimas. No obstante, es fácil darse cuenta de que éstas se refieren a la responsabilidad social de los científicos o a la orientación incorrecta o perniciosa de su trabajo y no a la ciencia misma. Un ejemplo de la mayor importancia se da en relación con la tecnología guerrera.

Un recorrido por los numerosos conflictos bélicos del siglo XX es suficiente para convencernos de que entre los científicos, específicamente entre los que voluntariamente se han asociado a la industria militar, abundan criminales de guerra que están al mismo nivel que los condenados en Núremberg; criminales que han puesto a disposición de los mandos militares y políticos, instrumentos de devastación y muerte como el gas mostaza, el napalm, la bomba de hidrógeno, los misiles teledirigidos o las armas bacteriológicas, aparentemente, sin remordimientos ni crisis de conciencia.

No es difícil percatarse de que las tendencias hegemónicas empujan en un sentido opuesto al de la solución del conflicto entre científicos y humanistas y que la magnitud del problema demanda una acción concertada entre ambos como parte activa de la conciencia de la sociedad y de sus propios gremios. Se trata entonces

de presentar un frente común y atreverse a tender puentes entre las culturas de ambos tipos y, conjuntamente, participar en la sociedad civil para contribuir a que el hombre y la mujer común puedan vivir una vida en la que sean dueños de su propio destino.

VIII. COMPLEJIDAD Y CAMBIO POSIBLE

Como científicos, queremos referirnos a las posibilidades que hoy se han abierto para empezar a tender esos puentes desde nuestra ribera. Sin duda, las oportunidades de hacerlo están directamente relacionadas con los cambios en la ciencia durante los últimos cuarenta años. Boaventura de Sousa Santos les atribuye el producir la sensación de que lo hecho desde el XVIII hasta mediados del siglo XX es “historia antigua” (De Sousa, 1992: 9) y de volver a poner en jaque –luego de las crisis producidas por la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad– nuestra “confianza epistemológica”:

Estamos abrumados por un sentimiento de pérdida irremediable, más extraña aún por nuestra incertidumbre respecto a a qué es exactamente lo que perdemos. A veces, hasta es posible preguntarnos si este sentido de pérdida no será sólo un temor que oscurece los más recientes avances de nuestra vida individual y colectiva y, de nuevo, siempre hay confusión respecto a qué exactamente se había ganado. (De Sousa, 1992: 11)

La desazón descrita por el sociólogo lusitano es legítima: la confianza en nuestras posibilidades de conocer el mundo estaba asentada en el dominio avasallador de la ciencia mecanicista que, como todo imperialismo, ocultaba sus defectos para dar la impresión de fortaleza. Sin embargo –una vez más, desde dentro de la propia ciencia y bajo el amparo de la razón– quienes crecieron como científicos en el estudio de los sistemas complejos reconocieron la incapacidad del reduccionismo mecanicista para comprender lo complejo.

Ya, en 1972, Phillip W. Anderson (Premio Nobel de Física en 1977) escribía:

La falacia principal en este tipo de pensamiento es que la hipótesis reduccionista no implica, en forma alguna, una [hipótesis] ‘construccionista’: la habilidad de reducir todo a leyes fundamentales simples no implica la habilidad de empezar desde esas leyes y reconstruir el universo. De hecho, entre más nos dicen los físicos de partículas respecto a la naturaleza de las leyes fundamentales, menos importancia parecen tener con respecto a los problemas reales del resto de la ciencia y mucha menos con respecto a los de la sociedad. (Anderson, 1972: 393)

En efecto, la visión mecanicista del mundo, consustancial al reduccionismo, es demasiado miope para comprender el comportamiento complejo de la materia: la emergencia de patrones geométricos, la aparición repentina de formas de funcionamiento coherente, el desarrollo y la evolución de esas formas, la autoorganización, etcétera. Estudiar esta realidad desde la perspectiva reduccionista es un despropósito y empeñarse en defender su validez, como ya lo hemos dicho, una necedad.

Pero fue el desarrollo de la matemática aplicada el que provocaría un vuelco en la década de los setenta del siglo pasado; en cascada, sus consecuencias han ido configurando una nueva forma concebir la relación entre realidad, física y matemática: al explorar el camino inverso al reduccionismo, se descubrió que aun sistemas dinámicos extremadamente sencillos pueden dar lugar a comportamientos complicados y explicar, con base en esto y en términos de principios primordiales simples, la aparición espontánea de características colectivas que no se hallan en los agentes individuales que actúan en los sistemas cuando estos se consideran por separado.

El estudio de los sistemas dinámicos no lineales ha dado lugar a conceptos y herramientas nuevos y a una terminología relacionada con sus propiedades. En particular, hoy se sabe que un sistema cuya evolución temporal está determinada por una dependencia funcional relativamente simple, puede presentar transiciones entre distintos estados y fluctuaciones en todas las escalas, y, no obstante su impredecibilidad intrínseca, es posible hallar regularidades en el comportamiento del sistema que lo distinguen, sin duda alguna, del azar. Los sistemas complejos no se definen –una definición es una trampa a la riqueza conceptual y fenomenológica de estos– es mejor caracterizarlos por sus propiedades y, entre éstas, las más relevantes son la autoorganización en zona crítica, la frustración y las propiedades emergentes.

Desde hace décadas, los físicos aprendieron a reconocer que en los sistemas abiertos, en aquéllos que intercambian materia, energía o información con su entorno, ocurre el fenómeno de *autoorganización*, entendido como la capacidad de tales sistemas de dar lugar a estructuras y patrones de manera espontánea, en ausencia de control externo.

Hay muchos ejemplos de autoorganización en lo cotidiano, quizá uno de los mejores es el de la formación de las nubes. Una mente candorosa se podría preguntar por qué el vapor de agua en la atmósfera no tiende, por difusión, a una distribución homogénea y uniforme. No lo hace porque la máquina solar crea gradientes de temperatura y estos, a su vez, provocan la ruptura del estado homogéneo (*ruptura de simetría*) y la organización del vapor de agua en las estructuras coherentes y discernibles que llamamos nubes. También hay ejemplos muy claros de autoorganización en sistemas sociales: los ciclos de actividad periódica en los hormigueros y termiteros suceden sin control o dirección centralizada; simplemente son el resultado de una acción colectiva inconcebible en un individuo (Miramontes y DeSouza, 1996). Los patrones espaciales que surgen de la autoorganización de los sistemas se llaman *emergentes* y no surgen como el resultado de algún programa o voluntad exógena.

La expresión *zona crítica* tiene un significado muy preciso en la termodinámica (Jensen, 1998) donde se usa asociada a los fenómenos de transición de fase o bifurcaciones. Cuando un sistema se encuentra en la zona crítica ocurren fenómenos extraordinarios: se dan estructuras espaciales y fluctuaciones temporales perfectamente discernibles y de todos los tamaños pero cuya distribución de magnitudes sigue leyes muy precisas, las llamadas leyes de potencias que, por plantearlo

coloquialmente, nos dicen que los eventos pequeños ocurren con frecuencia, los medianos con regular abundancia y los enormes con rareza. Tal y como ocurre con los terremotos y con la distribución de la riqueza en el mundo de hoy. En la zona crítica, una pequeña perturbación sobre el sistema puede llegar a influir el comportamiento de todos sus componentes (se dice entonces que existen ahí correlaciones de largo alcance). En pocas palabras, son sistemas cuyo grado de integración es tan elevado que lo que acontece en una parte del sistema no le es ajeno al resto (como en un organismo). En los sistemas físicos, para llegar a la zona crítica, es necesario controlar un parámetro. Por ejemplo, la temperatura, si se habla del diagrama de fases de algún compuesto.

La *autoorganización en zona crítica* es llegar a la zona crítica sin necesidad de afinar parámetros; es decir, sin controles exógenos. Este concepto es de importancia capital para intentar comprender los procesos que implican la acción colectiva de sistemas con un gran número de componentes o actores. La noción de autoorganización en zona crítica fue propuesta por Bak, Wiesenfeldt y Yeng (1987) y es, quizá, un concepto que, como las revoluciones copernicana y relativista, cambie profundamente nuestra manera de interpretar el mundo.

Por otra parte, en 1975, Gérard Toulouse propuso el término *frustración* (Toulouse, 1975). Su nombre no puede ser más elocuente: se dice que un sistema se encuentra *frustrado* si los agentes o partes que lo componen no pueden satisfacer simultáneamente todas las restricciones de la totalidad (para una definición precisa, ver D. L. Stein, 1980). Un ejemplo ayuda más que una serie de ecuaciones: en un sistema social, un cuerpo de leyes no puede satisfacer a todos los integrantes de la sociedad; lo que beneficia al banquero perjudica al ahorrador, lo que ayuda a una clase golpea a otra. Es imposible la satisfacción simultánea y total. La sociedad utópica tendría que encarar este hecho de manera de hacer rotativa la frustración entre todos los elementos sociales. La sociedad real resuelve el problema cargando de frustración siempre a los pobres, a las mujeres, a los indios o a minorías raciales o religiosas.

No hemos usado tecnicismos, nos interesa destacar la esencia de los conceptos y no su formalismo. Pero es necesario mencionar que el estudio de los sistemas complejos es una disciplina netamente matemática en la cual, como en la ciencia en general, es válido el uso de metáforas y analogías mientras se tenga conciencia de que todo se encuentra perfectamente sustentado.

Las consecuencias epistemológicas de los sistemas complejos son dramáticas y alcanzan las más diversas esferas del pensamiento. Existen sistemas cuyos agentes pueden ser de naturaleza muy diversa y, sin embargo, evolucionar de manera semejante. Dicho de otro modo: existen sistemas cuya base material microscópica es disímbola (átomos, moléculas, amibas, insectos, neuronas, computadoras, etc.) que, sin embargo, tienen manifestaciones macroscópicas semejantes (estructuras geométricas, redes, asociaciones, comportamientos colectivos, etcétera).

Esto permite definir clases de equivalencia dinámica mediante la identificación de todos los sistemas que tienen el mismo comportamiento macroscópico aunque su naturaleza microscópica sea distinta. De esta manera, la dimensión de las posi-

bles manifestaciones de la naturaleza es relativamente pequeña porque, con base en leyes simples, es posible explicar multitud de comportamientos complejos.

El proceso de abstracción que permite identificar semejanzas entre muchas y muy variables cosas es uno de los principios organizadores sobre los cuales se construye el conocimiento; está en la base de las distintas representaciones del mundo que los seres humanos han construido y nos ha permitido superar el pasmo ante la diversidad. Hasta muy recientemente, los intentos por aplicar este enfoque en las ciencias de la vida y el estudio de los procesos sociales habían fracasado o, calzados a fuerza, produjeron no sólo reservas sino animadversión de parte de los estudiosos de esos campos. El desarrollo de la teoría de sistemas dinámicos (cuyos cimientos fueron tendidos por Henri Poincaré a finales del siglo XIX) y el descubrimiento de grandes categorías de dinámicas universales, permite proponer una nueva concepción del mundo en la cual es posible descubrir, explicar y comprender el comportamiento de sistemas de muy diversa índole con las mismas herramientas matemáticas y el mismo aparato conceptual:

... puede ser una herramienta importante [para comprender] los fenómenos de evolución y revolución social, así como del papel activo y consciente del hombre como promotor de esos cambios; en ese sentido, los fenómenos de transición que se esbozan tanto a nivel físico como en el análisis de la evolución de la estructura de la ciencia, podrían estar presentes en todos los niveles. [...] Creemos que vale la pena añadir que [el entendimiento] de las leyes de evolución de la materia, a diversos niveles de los fenómenos de transición y amplificación de fluctuaciones, nos pueden ayudar a comprender la dinámica de los cambios sociales revolucionarios hacia una sociedad más justa, así como el papel del hombre como motor de estos cambios. (Cocho, 1975: 81-82)

Como se ve, hace casi treinta años se descubrió que el camino inverso al reduccionismo –la teoría de sistemas complejos– nos permite extender con una economía de medios semejante a la de la física tradicional, nuestra comprensión del mundo en muchas direcciones y abona la idea de que, por muy diversa que pueda ser la realidad, el conocimiento es uno solo y las distintas divisiones de la ciencia, imposturas.

En particular, la teoría de sistemas complejos contribuye a superar la antigua disputa entre lo que C. P. Snow llamó “las dos culturas” para referirse a la oposición entre ciencias y humanidades acentuada luego de las atroces aplicaciones de la física a la tecnología de guerra a mediados del siglo XX a las que nos hemos referido.

Por ahora, el pensamiento dominante entre quienes hacen la ciencia sigue siendo mayoritariamente reduccionista. Sin embargo, en las últimas tres décadas se ha confirmado que con las herramientas de los sistemas dinámicos no lineales es posible abordar y explicar aquellos problemas de formación de patrones en sistemas complejos descritos arriba, para los cuales la física tradicional es totalmente insuficiente. En lo social, ya hemos visto cómo los cambios de nuestros días ocurren con una rapidez inimaginable hace cincuenta años. Esto, por sí mismo, no configura una situación revolucionaria, pero sí da oportunidades de que se generen crisis de

distintos tamaños en las cuales una acción relativamente pequeña, ejecutada en el momento adecuado, puede provocar cambios importantes. Este es el tipo de situaciones en las cuales, dice el refrán chino, “una chispa puede incendiar toda la pradera”.

Desde el aparato de dominación, es claro que la contraparte hará esfuerzos por impedir aquellas acciones que, montadas en la cresta de las fluctuaciones, puedan dar lugar a un cambio en las cualidades del sistema. Todo es conflicto, como lo estableció Heráclito hace veinticinco siglos y es merced a la lucha que todo se resuelve: en zona crítica, la sociedad civil puede romper las barreras que el sistema le impone; en tal situación, los seres humanos se vuelven agentes de su propia historia, dueños de su destino y pueden dejar de ser juguetes, más o menos inconscientes, de los grupos de poder y de las fuerzas del mercado. Temporalmente, al menos, pueden conducir la revolución permanente.

IX. CONCLUSIÓN

En el preámbulo a la última sección de su libro, De Sousa ha escrito que:

Bajo las condiciones sociales y teóricas recién mencionadas, la crisis del paradigma de la ciencia moderna no es un triste lodazal de escepticismo o irracionalismo. Más bien, nos vemos ante el retrato de una familia intelectual grande e inestable pero también creativa y fascinante: en el momento de decirle adiós a puntos de referencia, ancestrales e íntimos, tanto teóricos como epistemológicos... un adiós en busca de una vida mejor en [algún lugar de] los alrededores, donde el optimismo está mejor fundamentado y la racionalidad es más plural y en donde, al fin, el conocimiento será nuevamente una aventura encantada.

De Sousa tiene razón cuando percibe a la familia grande de los científicos en los umbrales de un cambio de vecindario para reencontrarse con la aventura encantada del conocimiento. Al menos parcialmente, el encanto radica en que, desde nuestra ribera –como lo muestran los ejemplos que hemos presentado y muchos otros que pueden hallarse en las abundantes referencias que existen hoy sobre sistemas complejos– hemos empezado a romper las dicotomías entre naturaleza y sociedad y entre el todo y las partes; tenemos buenas razones para pensar que el método de la ciencia podrá también contribuir a romper las otras dicotomías que De Sousa señala en su propuesta imaginativa y aglutinadora del paradigma “del conocimiento para una vida digna”.

Estamos seguros de que el racionalismo sigue siendo el fermento subversivo que fue durante la Ilustración, mal que les pese a quienes se adueñaron de su discurso para someter a los demás. Si nos empeñamos en construir un futuro digno, mal haríamos en renunciar a uno de nuestros mejores instrumentos para hacerlo. Lo que hace falta es fortalecer la componente humanista del quehacer científico; hacer una ciencia rigurosa pero emocionalmente comprometida con la gente, capaz de dejar de ser patrimonio y sirviente de unos cuantos para convertirse en catalizador de esa vida digna que propone De Sousa y, así, contribuir a la felicidad de los seres humanos.

En las formaciones sociales dominantes de nuestros días, la capacidad creadora y el potencial liberador de la ciencia no alcanza ya a la mayoría de la población porque las clases dominantes la han enajenado para sí y la han depositado en un reducido grupo de iniciados. En cambio, el sistema promueve la difusión en los medios de programas insustanciales de “contenido científico” para el público en general; con ello apuntala al discurso científico como parte de su soporte ideológico, pero la superficialidad de la información produce en la gente o una aceptación acrítica de las bondades de ese discurso o un rechazo suspicaz y muchas veces bien fundamentado.

Frente a esto, la reacción de más de un grupo progresista ha sido, paradójicamente, reaccionaria: la satanización de la ciencia y una “vuelta al pasado” en la que se confunden tendencias críticas válidas y propuestas retrógradas que, a despecho de las intenciones de quienes las sostienen, se convierten en las mejores colaboradoras del aparato dominante. La atmósfera intelectual de nuestro tiempo se ha dejado arrastrar por la marea de la nueva derecha que proliferó después de la caída de la Unión Soviética. El desánimo se ha materializado con la aceptación de dicotomías que imponen los que dominan el mundo (“...están conmigo o en mi contra”). Estamos obligados a rechazar la elección entre la ciencia cómplice del poder y el humanismo confundido con lo *new age*.

La labor de la gente progresista honesta no es únicamente tratar de satisfacer las necesidades básicas de los seres humanos para evitar que la búsqueda imperiosa por sobrevivir nos esclavice y nos ponga al servicio del sistema o de tratar de resolver las necesidades biológicas como el alimento, el techo, la salud y la seguridad. También, se trata de ejercer el derecho de todos y de todas a la creatividad como suprema manifestación del espíritu humano.

En ese sentido, es preciso aprovechar la dinámica compleja del cambio social en nuestro tiempo y tender los puentes necesarios entre la ciencia y el humanismo porque, como hemos tratado de establecer en este ensayo, la separación de ambos campos no sólo es artificial sino esencialmente errónea y engañosa. Construyamos los puentes para educarnos en una nueva cultura: aprendamos a ser científicos conscientes de nuestra responsabilidad social y hagamos de la práctica de la ciencia una forma de ser humanistas. En sentido opuesto, transfórmese el desencanto de los humanistas en combate a la crítica neurótica de la ciencia y recupérese la confianza en la capacidad racional de la humanidad para transformar su historia. Desde ambas riberas, es preciso recuperar la esperanza: otra vez, como en el Renacimiento y en la Ilustración, postulemos al ser humano como la medida de todas las cosas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Anderson, Phillip W. (1972), "More is different", *Science* 177 (4047): 393–396.
- [2] Cocho Gil, Germinal (1975), "Algunos aspectos de la termodinámica de la vida", en *El origen de la vida: Symposium conmemorativo en homenaje a A. I. Oparin*. México: UNAM.
- [3] De Sousa Santos, Boaventura (1992), "A Discourse on the Sciences", en *Review*, Vol. xv-1: 9–47.
- [4] Goldenfeld, N. y Kadanoff, L. (1999), "Simple Lessons from Complexity", *Science* 284: 87–89.
- [5] Gutiérrez Sánchez, José Luis (1999), "Teorías, sistemas y comprensión del mundo", en Ramírez, S. (coord.), *Perspectivas en las teorías de sistemas*. México: CEIICH-UNAM / Siglo XXI, pp.93–100.
- [6] Jensen, Henrik Jeldtoft (1998), *Self-Organized Criticality*. Cambridge University Press.
- [7] Miramontes, Octavio y DeSouza, Og (1996), "The Nonlinear Dynamics of Survival and Social Facilitation in Termites", *Journal of Theoretical Biology* 181, (4): 373–380.
- [8] Stein, Daniel L. (1980), "Disordered systems", en Stein, D. L. (ed.), *Lectures in the Sciences of Complexity*. Nueva York: Addison-Wesley.
- [9] Toulouse, Gérard (1977), "Theory of the frustration effect in spin glasses: I", *Commun. Phys.* 2: 115
- [10] Waddington, Conrad Hal (1977), *Tools for Thought. How to Understand and Apply the Latest Scientific Techniques of Problem Solving*. Nueva York: Basic Books, Inc. Publishers.

EL UNIVERSO EN EXPANSIÓN*

LA cosmología moderna se inició en los años veinte cuando los astrónomos determinaron, por primera vez, el tamaño de nuestra galaxia, la Vía Láctea, y midieron las distancias a otras galaxias. El astrónomo norteamericano Edwin Hubble, además de ser el pionero en las mediciones de distancias cósmicas, descubrió que *el Universo está en expansión*. Más recientemente, el descubrimiento de la *radiación de fondo* confirmó la teoría de la *Gran Explosión* y fijó en forma más precisa los parámetros físicos del Universo.

Antes de entrar en especulaciones teóricas, veamos cuáles son las propiedades del Universo que toda teoría cosmológica debe explicar:

1. *Inhomogeneidad en "pequeña" escala.* La materia observable en el universo tiende a concentrarse principalmente en estrellas, las cuales forman a su vez galaxias: conglomerados de billones de estrellas. El tamaño típico de una galaxia es de unos 100 000 años luz (un año luz = 9.4×10^{12} km). Las galaxias tienden a agruparse, ya sea en grupos poco numerosos o en cúmulos de cientos o miles de galaxias. En los últimos años se han encontrado ciertas evidencias de cúmulos de galaxias que miden varios cientos de millones de años luz.
2. *Homogeneidad e isotropía a "gran" escala.* A escala de cúmulos de galaxias, el Universo tiene una distribución bastante homogénea. Existen algunas regiones vacías y otras donde hay una concentración mayor de galaxias, pero en promedio la densidad de la materia es prácticamente independiente de la posición en toda la región visible de Universo. Tampoco se ha detectado una dirección particular en el Universo (como, por ejemplo, una velocidad promedio de la materia en una dirección específica), por lo que se acepta que, además de homogéneo, el Universo es también isotrópico.
3. *Expansión del Universo.* El Universo se expande en forma homogénea e isotrópica, de tal forma que una galaxia se aleja de otra con una velocidad v proporcional a la distancia d entre ellas, de acuerdo con la fórmula $v = Hd$, donde H es la llamada constante de Hubble. Según las mediciones más recientes, el valor de H es de 15 a 30 km/s por cada millón de años luz de separación.

* Ensayo escrito por Shahen Hacyan y Germinal Cocho. Publicado en: Estrada, L. y Flores, J. (comps.), 1990. *Perspectivas en la biología y en la física*. México: UNAM.

4. *Radiación de fondo.* En 1967, los radioastrónomos Penzias y Wilson descubrieron una señal de microondas que proviene uniformemente de todas las regiones del cielo y es perfectamente constante en el tiempo. Esta radiación corresponde a la emitida por un *cuerpo negro* a 2.7 K. Como veremos más adelante, ésta debe ser la radiación reliquia de una época en la cual el Universo era muchísimo más caliente que ahora.
5. *La abundancia de hidrógeno y helio primordiales.* Según muchas evidencias astronómicas, la mayoría de los elementos químicos cuyo peso atómico es mayor que el del helio se formaron en las estrellas y posteriormente fueron arrojados al espacio. Los astrónomos han podido determinar que la composición química original del Universo debió ser aproximadamente tres cuartas partes de hidrógeno, una cuarta parte de helio y apenas una traza de otros elementos. También veremos cómo esta composición puede explicarse con la teoría de la *Gran Explosión*.

De los cinco “hechos cosmológicos” mencionados, los tres primeros ya eran conocidos en los años veinte. Uno de los pilares en la cosmología en el aspecto teórico es la teoría de la relatividad general de Einstein, que consideraremos brevemente a continuación.

LA CURVATURA DEL ESPACIO-TIEMPO

En la teoría de Einstein, el espacio y el tiempo no son independientes, sino que se unen en el concepto del *espacio-tiempo* de cuatro dimensiones. Además, según la relatividad general, el espacio-tiempo es curvo, y la gravitación es la manifestación de esta curvatura. Un objeto masivo deforma al espacio-tiempo y una partícula atraída por él no se mueve en línea recta sino que sigue una trayectoria determinada por la curvatura del espacio-tiempo.

Una superficie curva es un espacio de dos dimensiones que se puede visualizar como inmerso en el espacio normal de tres dimensiones. Riemann y otros matemáticos del siglo XIX mostraron que el concepto de espacio curvo se puede extender sin dificultades formales a cualquier número de dimensiones. Inicialmente, los espacios de Riemann fueron considerados como simples construcciones teóricas, hasta que Einstein encontró el sentido físico que poseen.

La primera aplicación de la relatividad general a la cosmología se debe al propio Einstein, quien propuso, en 1917, un modelo del Universo según el cual éste era semejante a la superficie de una esfera: finito pero sin fronteras. Sin embargo, el modelo de Einstein era estático, ya que en esa época no se había descubierto la expansión del Universo.

Poco después, el físico ruso Friedmann demostró que, según la teoría de la relatividad, el Universo puede estar en expansión, ya sea indefinidamente o hasta cierto momento, a partir del cual empieza a contraerse. El parámetro fundamental que determina uno u otro caso es la densidad de masa del Universo. Si en él hay suficiente materia, la atracción gravitacional de ésta detendrá finalmente la

expansión para iniciar una contracción; en caso contrario, la expansión cósmica proseguirá indefinidamente. Según los cálculos teóricos, la densidad crítica de masa que distingue entre uno y otro caso es del orden de 10^{-39} g/cm³. Hasta ahora, las observaciones astronómicas no han podido determinar en forma concluyente cuál es la densidad real del Universo, aunque parece no diferir muy drásticamente de la densidad crítica.

LOS PRIMEROS INSTANTES

Si el Universo está en expansión, en el pasado la materia debió estar más concentrada que ahora y el Universo debió tener un inicio. Mientras más nos remontamos en el tiempo, la densidad y la temperatura del Universo debieron ser mayores. Si se extrapola matemáticamente la historia del Universo hacia el pasado, se llega a un estado de densidad y temperatura formalmente infinitas al que los físicos llaman singularidad inicial. A partir de esa singularidad el Universo pudo nacer en una *Gran Explosión* y evolucionó hasta su estado presente. Según esta concepción, la edad actual del Universo es de 15 000 a 20 000 millones de años, dependiendo del modelo matemático que se considere y del valor preciso de la constante de Hubble. ¿Tiene sentido hablar de tiempo cero del Universo? En realidad, la relatividad general no describe fenómenos cuánticos, por lo que se cree que el modelo estándar de la Gran Explosión es válido sólo para tiempos mayores que el llamado tiempo de Planck, que es la única unidad fundamental de tiempo que se puede construir con las tres constantes naturales: G (constante de la gravitación), c (velocidad de la luz) y h (constante de Planck).

El tiempo de Planck es $(G/hc^5)^{1/2}$ y equivale a 10^{-44} s. Antes de ese tiempo, efectos cuánticos, aún desconocidos e incomprensibles, debieron conducir a la creación del Universo.

La radiación de 3 K es una reliquia de la Gran Explosión. Es la temperatura actual del Universo. Si extrapolamos hacia el pasado, la temperatura cósmica aumenta: podemos distinguir varios momentos críticos, algunos de los cuales corresponden a verdaderos cambios de fase del Universo. El último cambio de fase ocurrió cuando la temperatura cósmica bajó a algunos miles de grados Kelvin y se formaron los primeros átomos, al combinarse los electrones con los núcleos atómicos. Antes de ese momento, el Universo estaba lleno de plasma ionizado; al formarse los átomos, el Universo se volvió transparente y la materia se desacopló de la radiación. Esto ocurrió aproximadamente 500 000 años después de la Gran Explosión.

Más atrás en el tiempo, cuando la temperatura bajó a aproximadamente un millón de grados, se formó definitivamente el helio primordial. Los cálculos teóricos indican que el porcentaje de masa en forma de helio debió ser de un 25 %, y que este valor depende muy poco del modelo cosmológico utilizado. La concordancia de este resultado teórico con las observaciones es una de las pruebas más fuertes en favor de la teoría de la Gran Explosión. El helio primordial se formó unos tres minutos después de la Gran Explosión.

Aún más atrás en el tiempo, la temperatura era tan alta que las partículas y antipartículas podían coexistir, creándose y aniquilándose continuamente junto con la radiación. Por ejemplo, los electrones y positrones pudieron coexistir a temperaturas superiores a algunos miles de millones de grados, cuando el Universo sólo tenía un segundo de vida.

Todavía más atrás en el tiempo, y a temperaturas aún más altas, el Universo era una verdadera sopa de quarks y antiquarks, leptones y antileptones. Al bajar la temperatura, los quarks y antiquarks se combinaron para formar bariones y antibariones; el Universo era una mezcla incandescente de materia y antimateria. Antes de transcurrido un segundo de existencia del Universo, toda la antimateria se aniquiló con la materia, produciéndose radiación. Afortunadamente, había un ligero exceso de materia que sobrevivió a esa aniquilación –una partícula por cada 10^8 a 10^{10} pares de partículas y antipartículas. La materia en el Universo actual es ese pequeño exceso, cuyo origen puede deberse a cierta asimetría entre las propiedades de las partículas y las antipartículas descubierta recientemente (violación de CP).

TRES PROBLEMAS DE LA COSMOLOGÍA MODERNA

Antes de acercarnos más al momento de la Gran Explosión, consideremos brevemente dos problemas fundamentales de la cosmología moderna, que pueden ser la clave para deducir el estado del Universo en sus primeros microsegundos de existencia.

El primer problema es el de la homogeneidad. Como la luz recorre el espacio a una velocidad de 300 000 km/s, mientras más lejos observamos el Universo más atrás vemos en el tiempo. La radiación de 3 K es la luz emitida por el Universo en el instante en el que se volvió transparente, unos 500 000 años después de la Gran Explosión, y eso es lo más lejos que podemos ver. Como el Universo nació hace unos 15 000 millones de años, nuestro Universo *visible* es una esfera de 15 000 millones de años luz de radio, cuyo tamaño aumenta un año luz cada año. Ahora bien, si miramos en dos direcciones diametralmente opuestas en el cielo, vemos regiones que se encuentran separadas por una distancia de hasta 300 000 millones de años luz. Tales regiones no tuvieron tiempo de comunicarse entre sí, pues una señal luminosa entre ellas tardaría en unir las más que la misma edad del Universo; a pesar de este hecho todas las regiones en el Universo, en todas las direcciones, presentan la misma densidad de materia. ¿Cómo pudieron influirse regiones diametralmente opuestas para tener las mismas características físicas? De nada sirve que en el pasado la materia estuviera más concentrada, pues también el tamaño del Universo visible era proporcionalmente más pequeño y el tiempo para comunicar dos regiones opuestas del horizonte siempre fue mayor que la edad del Universo.

El segundo problema es el de la edad del Universo que, como vimos, no parece diferir drásticamente de la densidad crítica. Sin embargo, el modelo del Universo en expansión con exactamente la densidad crítica es matemáticamente inestable.

Se puede demostrar que, para que el Universo sea el que se observa en la actualidad, las condiciones iniciales del Universo debieron tener valores extremadamente precisos. Por ejemplo, la densidad del Universo en los primeros segundos no debió diferir de la densidad crítica correspondiente a esa época, en más de una parte en 10^{40} . ¿Cómo explicar tal precisión?

Otro problema es la aparente ausencia en nuestro Universo de monopolos magnéticos, cuando en realidad las teorías modernas de partículas elementales predicen que debieron formarse abundantemente en las condiciones físicas imperantes durante los primeros instantes del Universo.

Los tres problemas mencionados se pueden resolver en forma natural en una nueva versión de la Gran Explosión que es la teoría del Universo inflacionario, propuesta por A. Guth y otros en 1981. Según esta teoría, el Universo sufrió una expansión violenta (inflación) cuando su edad era de 10^{-35} s y su temperatura de 10^{28} K. A temperaturas mayores, se cree que las interacciones fuertes, electromagnéticas y débiles estaban unificadas en una sola. A 10^{28} K, las interacciones fuertes se desacoplaron de las electrodébiles, liberando una enorme cantidad de energía: un auténtico cambio de fase.

En los últimos años, los físicos de partículas elementales han puesto su atención en la cosmología, ya que muchas teorías modernas sólo pueden confirmarse en el “laboratorio” que es el Universo, donde se encuentran las energías que nunca se alcanzarán en los experimentos terrestres. Por otra parte, existe la posibilidad de explicar las propiedades del Universo a partir de las leyes del mundo subatómico. Los conceptos de “vacío cuántico” y de “gran unificación” son cruciales en ese sentido.

ESPACIO-TIEMPO Y VACÍO CUÁNTICO

En las secciones anteriores se habló de la relatividad general y de la dinámica del espacio-tiempo, mostrando que el espacio, “la nada”, tiene una dinámica y puede ser curvado; que tiene algunas de las características de “algo material”. Si lo comparamos con los llamados tres estados de la materia (sólido, líquido y gas), vemos intuitivamente que los dos últimos no pueden ser curvados y que sólo en los sólidos podemos hablar de curvatura y de deformación elástica. Si análogamente queremos comparar el espacio (con las características que presenta en la relatividad general) con alguno de los llamados estados de la materia, se sugiere que este espacio tiene las características de un sólido.

Con base en el comentario anterior, discutiremos algunas de las características de los sólidos, veremos si éstas tienen una contrapartida en la estructura y dinámica del espacio-tiempo, y si se sugieren de esta comparación propiedades adicionales de este espacio. En primer lugar comentaremos algunas de las características de los sólidos cristalinos perfectos, de los defectos puntuales y de las dislocaciones de borde y helicoidales.

Los sólidos cristalinos están constituidos de átomos espaciados de modo regular y en los cristales perfectos no se observan irregularidades. En las figuras 1a y 1b

se muestran los defectos puntuales y las dislocaciones, que son líneas de defectos cerradas o abiertas. En la figura 1c se ve que un sólido elástico flexionado muestra una serie de dislocaciones paralelas.

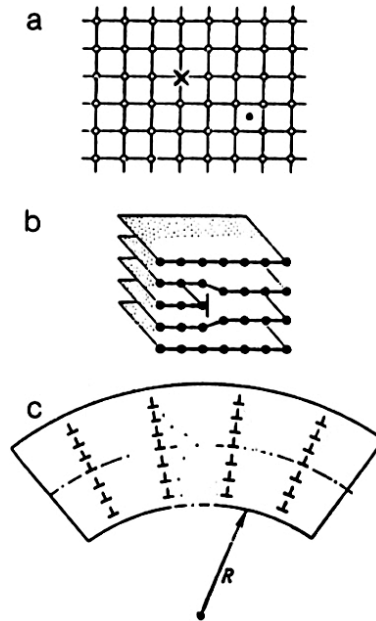


Figura 1: (a) Creación de defectos puntuales en un cristal: \times es un hueco y \bullet es un átomo intersticial. (b) Dislocación en un cristal. (c) Densidad de dislocaciones en un cristal curvado.

El vacío cuántico

Las características microscópicas del espacio están descritas por la física cuántica. Se denomina vacío cuántico al estado de menor energía de un sistema, al “espacio sin cosas” en el caso que estamos considerando. La imagen intuitiva que se tiene del espacio clásico newtoniano es de “una nada” donde no sólo no hay átomos sino tampoco luz. Es a la vez vacío y oscuridad. La imagen del vacío cuántico es radicalmente diferente, ya que está lleno de luz y partículas.

La energía de punto cero de cada uno de los osciladores de los campos cuánticos hace que el vacío cuántico tenga una energía infinita y la creación de pares de partículas virtuales durante un tiempo muy corto (debido al principio de incertidumbre de Heisenberg) hace que, en cierto sentido, se pueda considerar al vacío cuántico como lleno de luz y de partículas. Otro fenómeno que muestra que el vacío cuántico es algo diferente de “una nada” es el comportamiento de los sistemas acelerados. Un termómetro que se mueva aceleradamente a través del vacío marcará una temperatura proporcional a la aceleración y un espejo acelerado emi-

tirá luz. Vemos que frente a los objetos acelerados el vacío se comporta como un medio disipativo.

Además los avances recientes en la física de altas energías muestran que este vacío tiene propiedades de sólido, en consistencia con lo que sugiere la relatividad general.

Como en el caso de los sistemas naturales usuales, el vacío puede presentar cambios de fase. Un cambio de fase representativo de los que tienen lugar en los sólidos es el que sufren los sólidos ferromagnéticos cuando se les calienta; a temperaturas menores que la llamada temperatura de Curie, el material presenta una magnetización espontánea que disminuye al aumentar la temperatura, hasta anularse, a la temperatura de Curie y permaneciendo nula para temperaturas superiores. En este caso, para temperaturas menores a la temperatura crítica la magnetización (el parámetro de orden) es diferente de cero y se anula para temperaturas mayores.

Si calentásemos una zona del Universo a temperaturas suficientemente grandes esperaríamos que se presentasen cambios radicales en la estructura e interacciones de las partículas fundamentales, cambios que pueden considerarse asociados a cambios de fase del vacío cuántico. Parámetros de orden, semejantes a la magnetización de los sólidos ferromagnéticos, cambian de valor cuando la temperatura sobrepasa alguno de los valores críticos. Esto hace que interacciones con intensidades diferentes a ciertas temperaturas las tengan iguales a otras temperaturas y que la masa de algunas partículas se vuelva nula; a temperaturas muy altas todas las interacciones tendrían la misma intensidad, al descender la temperatura se separarían las interacciones fuertes de las electrodébiles y luego se romperían estas últimas en electromagnéticas y débiles. (Esto constituye la base de las “grandes teorías unificadas”). Estos fenómenos se presentarían para temperaturas sumamente altas que sólo se habrían presentado en los instantes iniciales de la Gran Explosión.

Los modelos teóricos del fenómeno de confinamiento de los quarks sugieren que, en ciertos aspectos, el vacío cuántico se comporta como un sólido superconductor (’t Hooft, T. D. Lee). A temperaturas muy altas el vacío efectuaría un transición a un vacío “conductor ordinario” y los quarks dejarían de estar confinados.

Supercuerdas

En las teorías usuales del campo cuántico (como en la electrodinámica cuántica), los cuantos, las partículas constituyentes, son puntos. Si las comparamos con los sólidos corresponderían a defectos puntuales.

En los últimos años se han desarrollado las llamadas teorías de supercuerdas que resuelven algunos de los problemas que se presentaban en las teorías de campo puntuales.¹ En estas teorías se supone que las partículas son cuerdas, objetos unidimensionales, no puntuales, y las leyes usuales de la física serían una apro-

¹ Ver el capítulo “Gran unificación y supercuerdas” en: Estrada, L. y Flores, J. (comps.), 1990. *Perspectivas en la biología y en la física*. México: UNAM.

ximación a una teoría más rica y detallada a distancias sumamente pequeñas (se supone que estas cuerdas tendrían una longitud de 10^{-33} cm, 10^{20} veces más pequeñas que un protón). Las cuerdas cerradas corresponderían al campo gravitacional, mientras que las abiertas a otros campos y las fluctuaciones cuánticas permitirían que una cuerda abierta se transformase en una abierta más una cerrada (las partículas como fuente de campo gravitacional). La estructura matemática de la teoría es consistente con interpretar estas cuerdas como dislocaciones del espacio-tiempo y en campos gravitacionales fuertes, con una “gran deformación elástica del espacio-tiempo”, tendríamos, como en el caso de los sólidos, una acumulación de dislocaciones, de cuerdas. Siguiendo la analogía, si suponemos que la “celda elemental” del espacio-tiempo es del orden de magnitud del tamaño de estas supercuerdas, tendremos una celda enormemente pequeña.

EL UNIVERSO INFLACIONARIO

Como se comenta en la primera parte de este trabajo, el modelo usual de la Gran Explosión enfrenta algunas dificultades (uniformidad del Universo, carácter plano de éste, baja densidad de monopolos magnéticos, etc). El llamado modelo del Universo inflacionario resuelve la mayoría de estas dificultades. Se supone que en las etapas tempranas del Universo se tienen regiones calientes (temperaturas del orden de 10^{27} grados) con respecto a la temperatura crítica de la transición de fase y que estas regiones se estaban expandiendo. En este régimen el valor de equilibrio del llamado campo de Higgs sería cero. Debido a la expansión caería la temperatura y sería termodinámicamente favorable que el campo de Higgs tomase un valor no nulo (del mismo modo que al descender la temperatura de un ferromagneto la magnetización toma un valor no nulo). Para ciertos valores de los parámetros de las teorías de la gran unificación esta transición tendría lugar de un modo muy lento y tendríamos el equivalente de un sobrenfriamiento, permaneciendo nulo el valor de equilibrio del campo de Higgs. A medida que baja la temperatura, se tendría una transición de un estado del vacío con menor energía y con un valor no nulo del campo; la energía liberada en la transición provocaría una expansión exponencial del espacio (inflación) en la que se doblaría su tamaño cada 10^{-34} s, pudiéndose alcanzar un factor de expansión de 10^{50} . Como en el caso de los ferromagnetos se podrían tener diversos dominios, cada uno de ellos originándose en una región inicial sumamente pequeña, cada uno de estos dominios, ya dilatados, correspondería a un “universo-burbuja” y nuestro universo sería una de estas burbujas. Esta enorme expansión inicial explicaría el problema de la isotropía (inicialmente todos los puntos de nuestro universo-burbuja estarían muy cerca unos de otros), de la gran dilución de los monopolos magnéticos formados inicialmente y del carácter plano (ver fig. 2).

Es interesante mencionar que en estos modelos la energía gravitacional (negativa) cancela exactamente la energía positiva asociada a las masas y al movimiento de las partículas, de modo que la energía total sea nula. El principio de incertidumbre de Heisenberg permitiría una duración muy grande de esta fluctuación,

de modo que, en cierto sentido, el Universo sería una fluctuación de la nada.

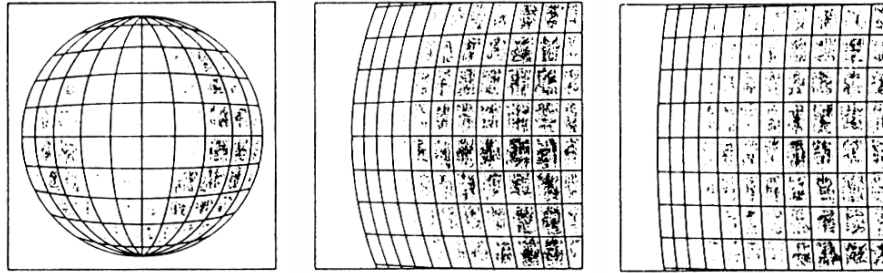


Figura 2: Dilatación de un espacio esférico bidimensional.

PERSPECTIVAS

Las analogías que existen entre el vacío cuántico y los sólidos sugieren algunas extrapolaciones:

1. En el caso de los sólidos la acumulación de dislocaciones puede provocar una fractura. Esto sugiere que en campos gravitacionales fuertes, como en los hoyos negros, la condensación de supercuerdas puede dar lugar a “fracturas del espacio-tiempo”.
2. Cuando se enfría y solidifica un líquido, la estructura del sólido resultante depende de la rapidez de enfriamiento y en muchos casos un enfriamiento relativamente lento da lugar a cristales, uno más rápido a cuasicristales y uno aún más rápido a sólidos amorfos. En paralelo con esto, en los primeros instantes de la Gran Explosión, cuando la temperatura había descendido rápidamente, podrían haberse formado dominios del vacío similares a cuasicristales o a materiales amorfos. Muchas de las características estructurales de los cuasicristales pueden derivarse mediante la proyección de un cristal en un número mayor de dimensiones y cabe preguntarse si esto puede servir de base a una reinterpretación del espacio-tiempo de 10 dimensiones de las supercuerdas. Por otro lado, el modelo caótico del Universo inflacionario pudiera estar asociado a estructuras amorfas formadas en los momentos iniciales de la Gran Explosión.
3. En el momento actual es tópic de investigación el potencial biológico y de memoria de los sistemas complejos y en particular de los sólidos desordenados. Cabe especular que la complejidad y las características del vacío cuántico le confieran un potencial biológico e incluso cognoscitivo. Si “la naturaleza hubiese aprovechado este potencial”, el espacio, es decir, el vacío cuántico, podría tener algunas de las características de los organismos vivos. Esto implicaría un cambio revolucionario de nuestra concepción del mundo.

BIBLIOGRAFÍA

- Astchison, I. J. R., (1985). *"Nothing's plenty The vacuum in modern quantum field theory"*. *Contemp. Phys.* 26: 333–391.
- Davies, P., (1985). *Superfuerza*, Salvat, México.
- Gueguzin, Ya. E., (1983). *El cristal vivo*. MIR, México.
- Hacyan, S., (1986). *El descubrimiento del Universo*, "La Ciencia desde México", núm. 6, Fondo de Cultura Económica, México.
- Linde, A. D., (1984). *"The inflationary universe"*. *Rep. Prog. Phys.* 47: 925–986

TEORÍAS DE SISTEMAS: HAKEN, PRIGOGINE, ATLAN Y EL INSTITUTO SANTA FE*

EN la época actual se habla mucho de la importancia de la dinámica no lineal y de los sistemas complejos como herramientas fundamentales para comprender el mundo donde vivimos. En este trabajo presentaré algunas contribuciones de científicos importantes en esos campos, así como parte de la labor realizada en la Facultad de Ciencias y en el Instituto de Física de la UNAM.

En primer lugar haré algunos comentarios sobre la labor de Ilya Prigogine, de la Universidad Libre de Bruselas, laureado con el Premio Nobel de Química en 1975 por sus contribuciones a la termodinámica lejos del equilibrio y en particular por sus investigaciones sobre las estructuras disipativas.

En sus trabajos Prigogine enfatiza la importancia de los sistemas abiertos lejos del equilibrio, de la creación de estructuras disipativas espacio-temporales en esas condiciones, teniendo como mecanismo principal la amplificación de fluctuaciones y considerando la vida como una cascada de transiciones de unas estructuras disipativas a otras. En sus palabras:

Las inestabilidades químicas debidas a la rotura de simetría conducen a una *autoorganización* espontánea del sistema, tanto desde el punto de vista de su *estructura espacial* como de su *función*. Estamos en presencia de ejemplos típicos de estructuras disipativas que corresponden a un valor bajo de la entropía. Se pueden encontrar situaciones similares en sistemas capaces de utilizar una parte de la energía o de la materia intercambiada con el medio exterior para construir un orden microscópico interno [...] Todos estos resultados muestran que la disipación de la energía puede ser una fuente de organización, favoreciendo el establecimiento de un orden, tanto en el tiempo como en el espacio. Se tiene pues la tentación de darles un papel fundamental en los esfuerzos para cruzar la brecha que separa hoy en día la biología de la física. (Glansdorff y Prigogine, 1971)

Vale la pena mencionar los planteamientos paralelos de Hermann Haken con respecto a lo que denominó *sinérgica*, donde se estudian los cambios de fase fuera del equilibrio y la autoorganización en física, química y biología. En la introducción de su libro sobre sinérgica, Haken comenta:

* Publicado en: Ramírez, S. (coord.), 1999. *Perspectivas en las teorías de sistemas*. México: CEIICH-UNAM / Siglo XXI.

La formación espontánea de estructuras bien organizadas a partir de gérmenes o, más aún, del caos es uno de los fenómenos más fascinantes y uno de los retos más importantes a los que se enfrentan los científicos. Tales fenómenos son una experiencia de nuestra vida diaria cuando observamos el crecimiento de las plantas y de los animales. Al pensar en escalas de tiempo muy largas los científicos se enfrentan al problema de la evolución y en última instancia al del origen de la materia viviente. Cuando tratamos de explicar o comprender estos fenómenos biológicos extraordinariamente complejos es natural el preguntarse si se pueden encontrar procesos de autoorganización en sistemas más simples del mundo inanimado.

En años recientes han sido cada vez más evidentes numerosos ejemplos de sistemas físicos y químicos en que se originan estructuras espacio-temporales a partir de estados caóticos y que, como en los organismos vivos, el funcionamiento de estos sistemas puede mantenerse mediante el flujo de energía y materia a través de ellos. A diferencia de las máquinas construidas por el hombre, estas estructuras se desarrollan espontáneamente, se autoorganizan. Ha sorprendido a muchos científicos que muchos de tales sistemas muestren parecidos notables en su comportamiento al pasar de un estado desordenado a otro ordenado. Esto sugiere fuertemente que el funcionamiento de tales sistemas obedece los mismos principios, y que las concepciones y herramientas matemáticas que se tienen en la actualidad pudieran permitir entender su comportamiento. (Haken, 1977)

Como actividades similares realizadas en la UNAM, podemos mencionar el Programa de Ciencia y Sociedad de la Facultad de Ciencias constituido alrededor de 1973 y cuyas raíces fueron los acontecimientos e inquietudes que tuvieron lugar en México y en el mundo a partir de 1968. El programa contó con un grupo interdisciplinario –investigadores, maestros y estudiantes de física, matemáticas y biología, así como un economista y un sociólogo– en el que se trató de definir y poner en práctica lo que podríamos llamar un enfoque progresista de izquierda de la ciencia. Entre otras actividades, hubo seminarios en los que se enfatizó la importancia de los fenómenos críticos y de los cambios cualitativos, y se discutió tanto la física de dichos fenómenos y la matemática de la teoría de las catástrofes como el psicoanálisis y los trabajos de Piaget, teniendo en mente la presencia de rasgos universales asociados a los diversos “niveles de la materia” en el punto crítico. Algunas de las conclusiones fueron presentadas en cursos de licenciatura y durante tres años se puso en práctica un “Paquete de posgrado sobre sistemas complejos abiertos físicos, biológicos y sociales”. Sin embargo, esta iniciativa desapareció debido a que eran pocos los investigadores asociados al paquete, uno dejó el país y otro salió en año sabático.

Algunos de los planteamientos que se tenían en mente fueron presentados en un simposio en homenaje a Oparin, que tuvo lugar en 1975. En dicho trabajo, tras de formular algunas de las ideas de Prigogine, incluyendo los cambios de fase por amplificación de fluctuaciones, se comentaba:

Esto sugiere que el estudio de tales saltos cualitativos, tales transiciones, y la amplificación de fluctuaciones en sistemas complejos, puede ser una herra-

mienta importante en la comprensión de los fenómenos de evolución y revolución social, así como en el papel activo y consciente del hombre como promotor de esos cambios; en ese sentido, los fenómenos de transición que se esbozan tanto a nivel físico como en el análisis de la evolución de la estructura de la ciencia, podrían estar presentes a todos los niveles [...] Creemos que vale la pena añadir que el entendimiento de las leyes de evolución de la materia, a diversos niveles de los fenómenos de transición y amplificación de las fluctuaciones, nos puede ayudar a comprender la dinámica de los cambios sociales revolucionarios hacia una sociedad más justa, así como el papel del hombre como motor de estos cambios. (Cocho, 1975)

Relacionado con el estudio de la dinámica no lineal en la UNAM, en 1985 fue creado el Departamento de Sistemas Complejos en el Instituto de Física, el cual se dedicó al estudio de sistemas físicos como los sismos y otros físico-químicos y biológicos como la evolución de secuencias genéticas. Hacia ese año ya había surgido a nivel mundial un gran interés acerca de las geometrías fractales y el comportamiento caótico de los sistemas deterministas. Aunque aspectos importantes de los sistemas caóticos ya habían sido estudiados por Poincaré, el énfasis fundamental se ponía tradicionalmente en sistemas deterministas poco sensibles a las condiciones iniciales y a las contingencias históricas, sistemas en los que perturbaciones pequeñas implican también diferencias pequeñas para todo tiempo posterior. El interés se trasladó a poner más énfasis en sistemas muy sensibles a las condiciones iniciales y a las contingencias históricas en los que cambios pequeños se van amplificando y en los cuales después de cierto tiempo se tiene un comportamiento muy distinto del que se habría tenido en ausencia de dichas perturbaciones pequeñas. Este comportamiento, denominado *caótico*, en que se tiene un horizonte de predictibilidad limitado, en vez del horizonte de predictibilidad infinita de los sistemas deterministas poco sensibles a las condiciones iniciales, puede presentarse en áreas importantes de los fenómenos físicos, biológicos y sociales. Tales horizontes limitados implican la necesidad del control periódico de dichos sistemas, para lo cual se necesita información y métodos de diagnóstico sobre su estado. Este horizonte de predictibilidad es nulo para sistemas azarosos.

Paralelamente al surgimiento del interés en los fenómenos caóticos y coherente con los trabajos de Prigogine sobre las transiciones debidas a la amplificación de fluctuaciones, se discute el papel del ruido y del desorden como creadores de información. En ese sentido, Henri Atlan, en su obra *Entre el cristal y el humo*, asegura:

Cualquier organización celular está compuesta de estructuras fluidas y dinámicas. El torbellino líquido que destrona la ordenación rígida del cristal se ha convertido, o vuelto a convertir, en el modelo, al igual que la llama de la vela, a medio camino entre la rigidez del mineral y la descomposición del humo. [...] Ahí es donde las dos nociones opuestas de repetición, regularidad, redundancia, por un lado, y variedad, improbabilidad, complejidad, por el otro, pueden ser sacadas a la luz y reconocidas como ingredientes que coexisten en esas organizaciones dinámicas. Éstas aparecieron así como compromisos entre dos extremos: un orden repetitivo perfectamente simétrico del que los crista-

les son los modelos físicos más clásicos, y una variedad infinitamente compleja e imprevisible en sus detalles, como la de las formas evanescentes del humo. (Atlan, 1990)

Una de las tesis principales de Atlan es que la adaptación y la creatividad están asociadas a la interrelación coherente del orden, con previsibilidad total, y el desorden –el ruido–, que permitiría el encontrar y plantear situaciones inesperadas. Una interrelación armónica de orden y desorden permitiría a las estructuras ordenadas asimilar lo “descubierto por el desorden”. Entre otros aspectos, Atlan discute, además, el papel de esta interrelación creativa en el cerebro humano, asociando los aspectos ordenados a la memoria-consciencia y el “desorden creador” al inconsciente. Las creaciones desordenadas y contradictorias del inconsciente serían asimiladas y ordenadas por la memoria consciente, y cuando existen desequilibrios en este proceso de asimilación se podrían tener trastornos psíquicos. Tenemos, pues, que para Atlan la interrelación coherente entre el orden y el desorden es un mecanismo fundamental en la adaptación y el aprendizaje.

Planteamientos en la dirección anterior han sido expuestos a partir del estudio de los sistemas deterministas en regímenes ordenado y caótico y del estudio de la zona de transición entre ambos regímenes, la zona crítica que separa el orden de caos. Se ha podido probar que en dicha zona, en lo que algunos han llamado “evolución al borde del caos”, los sistemas tienen un gran potencial de adaptación, coevolución y aprendizaje. En tal zona se presentan fenómenos con todos los horizontes de predictibilidad, desde muy pequeños a infinitos, correlacionados entre sí por principios generales y propiedades genéricas, teniendo el potencial para una evolución y aprendizaje creativos. Además, se puede mostrar que distintos sistemas que se comportan diferentemente fuera de esta zona crítica se comportan de modo muy parecido cuando están en ella, pudiéndose así trasplantar lo que se sabe de un sistema a otro.

Una institución donde se han llevado a cabo muchos estudios sobre orden, caos y su frontera, así como las implicaciones para sistemas biológicos, económicos y sociales es el instituto de Investigaciones en Ciencias de la Complejidad, en Santa Fe, Nuevo México, Estados Unidos. En este instituto permanecen, durante periodos de longitud variable, físicos, matemáticos, biólogos y científicos sociales, tratando de entender lo que se tiene de similar y de diferente y planteando y resolviendo problemas interdisciplinarios. Asimismo, todos los años organizan escuelas sobre ciencias de la complejidad y talleres sobre tópicos como inteligencia artificial, dinámica y análisis computacional del material genético, estudio de series de tiempo y predicción, redes neuronales, la economía como un sistema complejo, lenguajes e inmunología teórica. Todo esto tratando de desarrollar modos de comunicación entre matemáticos, físicos, biólogos, economistas y sociólogos, sin tener miedo a explorar nuevas áreas, pero a la vez siendo muy críticos respecto a lo que hacen.

Cabe mencionar que en más de un aspecto, aunque sin perder de vista las diferencias de escala, tanto el Programa de Ciencia y Sociedad de la Facultad de Ciencias, como el Departamento de Sistemas Complejos del Instituto de Física de

la UNAM, se adelantaron en sus planteamientos al Instituto de Santa Fe e instituciones similares.

Cierro este trabajo con la certeza de que, para comprender aspectos del comportamiento de nuestro mundo en crisis, es de suma importancia el estudio de los sistemas complejos, en particular cuando están en zona crítica. Creemos que es posible (y quizá necesario) un programa de posgrado sobre "Investigaciones en sistemas complejos en las ciencias naturales y sociales", que podría ser constituido por la Facultad de Ciencias, la de Ciencias Políticas y Sociales y el Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades.

BIBLIOGRAFÍA

- Atlan, H., 1990. *Entre el cristal y el humo: ensayo sobre la organización de lo vivo*. Trad. del francés por Manuel Serrat Crespo. Madrid: Debate.
- Cocho, G., 1975. "Algunos aspectos de la termodinámica de la vida". En Lazcano-Araujo, A. y Barrera, A. (eds.), *El origen de la vida: symposium conmemorativo en homenaje a A. I. Oparin*. México: UNAM.
- Glansdorff, P. y Prigogine, I., 1971. *Structure, stabilité et fluctuations*. París: Masson et cie, éditeurs.
- Haken, H., 1977. *Synergetics. An Introduction. Nonequilibrium Phase Transitions and Self-Organization in Physics, Chemistry and Biology*. Berlín: Springer-Verlag.

⊙ *Esta es una página en blanco.* ⊙

AL BORDE DEL MILENIO: CAOS, CRISIS, COMPLEJIDAD *

ALGO especial ha de estar pasando con la ciencia ahora que nos encontramos *al borde* del milenio. Si ojeamos los periódicos, sintonizamos el televisor o simplemente nos asomamos por la ventana, vemos que nos encontramos en tiempos de *crisis*, de cambio, de inestabilidad, de *incertidumbre*, ante los cuales tenemos que *adaptarnos*. De situaciones *caóticas* emergen respuestas *colectivas*. Pequeñas inestabilidades precipitan eventos *catastróficos*. Se vive en la *globalización*, todo se encuentra *correlacionado*, se tienden *redes* económicas, se navega en el ciberespacio. Se generan *superestructuras*, movimientos se *autoorganizan*. Se vive en la *marginalidad*. La sociedad se ve tan *compleja*. Bueno, y este delirio apocalíptico sobre nuestra cotidianidad, ¿qué tiene que ver con la ciencia?

El objetivo de este ensayo es adentrarnos en el significado que tienen las palabras resaltadas en el contexto de la ciencia. Asomarnos, en un vuelo impresionista, a una nueva forma de hacer ciencia, con una novedad impregnada del aroma de la filosofía natural de otros tiempos. Se trata de una experiencia interdisciplinaria que, a pesar de no ser generalizada en el medio, representa una de las puntas de lanza de la investigación más promisorias.

COMPLEJIDAD

En términos más formales, el propósito podría versar acerca de nuestro interés en el estudio de sistemas con muchos componentes que interactúan fuertemente entre sí, dando lugar a la emergencia de una variedad de comportamientos globales que se encuentran interrelacionados. Ejemplos de esta naturaleza abundan en nuestro entorno: los cambios atmosféricos, la bolsa de valores, una célula, la memoria, un flujo turbulento... La evolución temporal de estos sistemas es no lineal, esto es, los efectos no son proporcionales a las causas. Al estudiar su desarrollo resulta que con frecuencia el detalle del comportamiento dinámico de los componentes es irrelevante para la caracterización de las llamadas propiedades emergentes; una clase amplia de situaciones originan el mismo comportamiento colectivo, dando lugar a un grado de universalidad. Se distinguen entonces varios niveles de descripción, aparecen jerarquías y, en cierta medida, se cumple el principio aristotélico de que

* Ensayo escrito por Gustavo Martínez Mekler y Germinal Cocho Gil. Publicado en: De la Peña, L. (coord.), 1998. *Ciencias de la materia: Génesis y evolución de sus conceptos fundamentales*. México: CEIICH-UNAM / Siglo XXI.

de todo es mayor que la suma de las partes.¹ ¿Será que nos estamos volviendo anti-reduccionistas? Frecuentemente, cuando la literatura científica se refiere a este tipo de comportamiento, se habla del estudio de sistemas complejos.² ¿Pero, no les parece que lo que hay en la naturaleza son sistemas en los cuales ocurren procesos, y son éstos los que pueden o no presentar comportamientos complejos? La complejidad viene asociada con el nivel de descripción y con los aspectos estructurales, dinámicos y funcionales en que estemos enfocando nuestra atención. En este sentido, un mismo sistema puede ser catalogado como complejo y simple a la vez. Con este enfoque, la dicotomía holismo-reduccionismo³ se suaviza, pudiéndose plantear una síntesis complementaria. Para ciertos aspectos, el conocimiento detallado de los componentes se trasmina de un nivel a otro de la jerarquía, para otros es secundario.⁴

Por supuesto, la controversia holismo-reduccionismo, proceso-mecanismo, se ha venido planteando continuamente a lo largo de la historia... ¿Entonces, por qué tanto alboroto ahora? ¿Será porque contamos con las herramientas para poder abordar estudios que antes estaban fuera de nuestro alcance? ¿Serán los tiempos que vivimos, las estructuras sociales, económicas y políticas? ¿Será la sofisticación tecnológica a la que hemos llegado? La respuesta parece ser afirmativa en todos los casos. Veamos ahora con más detenimiento algunos de los conceptos arriba expuestos.

¹ El Premio Nobel de Física Murray Gell-Mann se refiere a este tipo de comportamiento al describir los sistemas complejos así: "Una de las características de los sistemas complejos no lineales es que no pueden, en general, ser analizados exitosamente determinando con antelación un conjunto de propiedades o aspectos estudiados separadamente, para luego combinar esos tratamientos parciales en un intento de formar una imagen del todo. En lugar de ello, es necesario observar todo el sistema, aun cuando ello implique tener una visión cruda del mismo, y luego permitir que emerjan del trabajo realizado posibles simplificaciones" (Gell-Mann, 1992). [Aquí y subsecuentemente las traducciones son nuestras].

El escritor James Gleick puntualizó en una conferencia lo siguiente: "Existen leyes fundamentales de los sistemas complejos, pero son un nuevo tipo de leyes. Son leyes sobre estructura, organización y escala, y se desvanecen al enfocarse sobre los componentes del sistema complejo –tal como la psicología de una muchedumbre a punto de realizar un linchamiento se desvanece si uno entrevista en forma individual a los participantes" (Weinberg, 1992).

² No existe (y tal vez nunca existirá) una definición universalmente aceptada de sistema complejo y complejidad. Para una discusión extensa al respecto, véase Grassberger (1991). Durante la última década la investigación y la divulgación sobre sistemas complejos ha sido fuertemente impulsada en Estados Unidos por el Instituto Santa Fe, cuya labor en publicaciones es muy extensa. Con anterioridad, sistemas con características semejantes a las que hemos mencionado para los sistemas complejos fueron estudiados en el marco de las llamadas estructuras disipativas (estructuras autorganizadas con flujo de materia y energía que se forman muy lejos del equilibrio termodinámico) introducidas por el Premio Nobel Ilya Prigogine (Glansdorff, 1971) y en el contexto de la sinérgica (estudio de la acción de muchos subsistemas que dan lugar a estructura y funcionalidad en una escala macroscópica) a lo largo de las líneas propuestas por H. Haken (1978). Una introducción en español al estudio de algunos aspectos de los sistemas complejos, con una amplia bibliografía, se encuentra en Martínez M. (1993).

³ Para los propósitos de este escrito entendemos por holismo el punto de vista según el cual para el entendimiento del comportamiento del todo no basta el conocimiento del comportamiento de las partes por separado.

⁴ Leo Kadanoff (medalla Boltzmann, máxima distinción internacional en física estadística) ilustra este punto de vista en términos de pilas de arena y de fluidos sujetos a un gradiente de temperatura (Kadanoff, 1991).

NO LINEALIDAD

Casi todos los fenómenos que observamos en la naturaleza son no lineales, como casi todos los mamíferos son no elefantes. Es claro que en zoología los esfuerzos no han sido monopolizados por el estudio de los elefantes. Entonces, ¿por qué el predominio, hasta hace dos décadas, del estudio de los sistemas lineales? No es cuestión de dificultad, ya que algunos tratamientos lineales son muy complicados.⁵

De hecho, la respuesta es compleja, pues además de estar relacionada con los puntos mencionados en el párrafo anterior, tiene que ver con cuestiones como: el concepto de solución de un problema, el “prejuicio” por soluciones exactas, el éxito de los tratamientos lineales en el mundo cuántico.⁶ Un elemento fundamental se asocia con la capacidad de poder predecir o controlar comportamientos. Suponemos que estarán de acuerdo en que la predicción y el control son algunos de los principales retos de la investigación científica y de sus aplicaciones. Examinemos qué tiene que ver la no linealidad al respecto.

Un problema lineal se considera resuelto cuando se tienen soluciones cuantitativas. Al abordar la no linealidad, las soluciones *cuantitativas* quedan por lo general fuera de nuestro alcance, pero no así los comportamientos *cualitativos*. Éstos pueden ser descifrados, y su estabilidad determinada. El análisis geométrico de la dinámica empleado para ello se originó con los trabajos de Henri Poincaré, de finales del siglo XIX y principios del XX. Resulta que en 1892, al participar en un concurso destinado a la resolución del problema de n -cuerpos con interacción gravitacional, Poincaré demostró que no es posible asegurar que el sistema solar se mantendrá para siempre en una configuración semejante a la presente.⁷ Pero ¿se dan cuenta de que con ello se pone en entredicho la estabilidad del sistema solar, el coto máspreciado de la mecánica newtoniana? En su libro *Science et méthode*, Poincaré (1909) deja claro que “una pequeña causa, fuera de nuestro control, determina un efecto que no podemos ignorar, por lo que decimos que ese efecto es resultado del azar”.⁸ Tenemos entonces un sistema dinámico⁹ completamente determinista,

⁵ Es conveniente hacer la distinción entre complicado y complejo. Uno habla, por ejemplo, de un complejo industrial o de un ecosistema complejo; estos sistemas no son simples, conllevan un alto grado de organización, estructura y funcionalidad. Otro ejemplo es el término “número complejo” introducido por Gauss, en donde es claro que no tenía en mente un número complicado. La relación complicado-sencillo se refiere más bien al grado de dificultad involucrado en el tratamiento de un problema, a lo intrincado de las situaciones en estudio. A menudo se confunden estos términos en la literatura (Oono, 1998).

⁶ En el capítulo 5 del libro *In the Wake of Chaos*, el autor, H. Kellert (1993), presenta una discusión a fondo sobre este tema.

⁷ Recientemente, este episodio de la historia de la ciencia ha recibido considerable atención; véanse por ejemplo Barrow–Green (1997), Peterson (1993) y Diacu (1996).

⁸ D. Ruelle (también medalla Boltzmann) presenta un recuento particularmente lúcido de estos temas en su libro *Chance and Chaos* (Ruelle, 1991).

⁹ Para los propósitos de esta exposición consideramos como sistema dinámico la descripción de la evolución en el tiempo de un sistema determinista. Para una definición rigurosa del término véase el artículo de Steven Smale (medalla Fields, máxima distinción internacional en matemáticas) en la referencia (Smale, 1967).

el cual adquiere un comportamiento aparentemente azaroso debido a una sensibilidad extrema a sus condiciones iniciales. En otras palabras, lo que tenemos es la semilla de lo que actualmente se identifica en la literatura científica como *caos determinista*.

Puesto que el caos sólo aparece con dinámicas no lineales, y como durante buena parte del siglo XX se confundieron sus manifestaciones con una especie de “ruido molesto” que apantalla comportamientos regulares, predecibles y controlables, el estudio de los sistemas no lineales se vio relegado a un segundo plano. Pese a la veracidad del anterior argumento, conviene hacer una aclaración para evitar malos entendidos: si bien el caos requiere de la no linealidad, el reverso es falso. La no linealidad no conduce necesariamente a un comportamiento caótico; es más, la no linealidad puede generar dinámicas regulares, periódicas y muy estables. Por ejemplo, para ciertos valores de los parámetros, los procesos de *retroalimentación* pueden generar ciclos límite y estructuras espacio-temporales robustas.¹⁰ La potencialidad de este comportamiento para las comunicaciones y la electrónica de dinámicas no lineales fue claramente percibida en la ex Unión Soviética; prueba de ello es que muchos estudios al respecto se publicaron en revistas de radiofísica. Además, se estableció una “escuela rusa” sobre estudios no lineales alrededor de figuras como Andronov y Pontryagin, que con el tiempo condujo a la formación de investigadores de la talla de Anosov, Arnold, Novikov y Sinai, entre otros. En Occidente los intentos de desarrollar los métodos cualitativos para problemas no lineales fueron más esporádicos, aunque cabe mencionar los trabajos de Cartwright, Levinson y Littlewood sobre problemas de osciladores forzados.

Pero, entonces, ¿cómo se explica la transición de la falta de interés por el “ruido molesto” al furor por el caos que se generó a partir de los años setenta?¹¹ Resulta

¹⁰ Una excelente y entretenida presentación de la dualidad orden-desorden resultante de dinámicas no lineales se encuentra en el libro *Espejo y reflejo: del caos al orden* (Briggs, 1990). En particular se presentan dos ejemplos espectaculares de formación de estructuras espacio-temporales estables debidos a dinámicas no lineales: la Gran Mancha Roja de Júpiter y los tsunamis u olas sísmicas. La Mancha Roja es tan grande y estable que puede albergar muchas veces a la Tierra y ha sido observada por más de 300 años. Está situada en el hemisferio meridional, debajo del ecuador del planeta; mantiene su latitud y se desplaza lentamente alrededor de Júpiter. Observaciones astronómicas por medio del Voyager, simulaciones numéricas y experimentos realizados en la Tierra, indican que se trata de una perturbación atmosférica con una dinámica no lineal en la cual un orden de gran escala emerge del caos en escalas pequeñas. Pequeños vórtices se van amalgamando formando una estructura amplia y estable.

Los tsunamis se forman cuando una perturbación sísmica sacude el lecho oceánico. Se genera entonces una ola con una altura pequeña (centímetros o metros) y longitud de onda larga (cientos de metros) que puede viajar miles de kilómetros. Al llegar a las costas, debido a efectos no lineales de aguas poco profundas, la ola acorta su longitud de onda e incrementa su altura drásticamente (decenas de metros), causando tragedias como la muerte de 100 mil personas en Japón en 1702. A este tipo de ondas viajeras no lineales se las conoce como *solitón*.

¹¹ Cabe aclarar que nuestra respuesta a esta pregunta es parcial. Son muchos más los factores y actores que contribuyeron al desarrollo del estudio de los sistemas caóticos. Nuestra selección está condicionada por cuestiones de espacio y por su relevancia para el material que se presentará más adelante. Nombres que sin embargo no deben ser omitidos son: *i*] el meteorólogo Eduard Lorenz, quien se percató de la sensibilidad ante condiciones iniciales en estudios numéricos de ecuaciones no lineales asociadas a flujos con soluciones no periódicas (Lorenz, 1963), y *ii*] los astrónomos Michel Hénon y Carl Heiles, quienes reportaron en 1964 sus estudios sobre el comportamiento no periódico de las

que por esa época, tanto Feigenbaum (1978) como Tresser y Couillet (1978) mostraron que se puede obtener un comportamiento extremadamente complejo de una ecuación de evolución extremadamente sencilla. El mapeo (transformación) que estudió Feigenbaum es conocido con el nombre de *logística* y fue propuesto por Robert May (1976) para el estudio de la dinámica de poblaciones marinas. Su forma explícita es $x_{t+1} = \mu x_t(1 - x_t)$, donde x_t indica la “densidad de población” de una especie al tiempo t (el cual ha sido discretizado) y μ es un parámetro asociado con la tasa de crecimiento de la población. La no linealidad viene del cuadrado de x_t , término que aparece en la forma de una retroalimentación y representa una restricción ecológica (poblaciones muy grandes reducen la posibilidad de crecimiento). Con la anterior interpretación, x tiene sentido cuando toma valores entre cero y uno. Si el rango de μ se restringe entre 0 y 4, entonces las x se mantendrán en el intervalo adecuado a lo largo del tiempo. Sucede que al ir variando μ , la dinámica a tiempos largos presenta cambios cualitativos para valores específicos de μ ; al pasar por tales valores ocurre lo que en sistemas dinámicos se conoce como una *bifurcación*. Cuando μ toma valores entre 0 y $\mu_\infty = 3.569945\dots$ la dinámica tiende a un comportamiento fijo o periódico para tiempos largos (véase la figura 1, periodos 1, 2, 4). Ese comportamiento estable corresponde a lo que se conoce como un *atractor*; las evoluciones temporales (órbitas) quedan eventualmente (esto es, después de un transitorio) regidas por el atractor. Es *interesante* observar que las órbitas van duplicando su periodo (doblamiento de periodo) al incrementarse μ hasta llegar al valor μ_∞ , para el cual se tiene un comportamiento de “periodo infinito”, lo que corresponde a la emergencia del caos. Resulta *sorprendente* que pueda establecerse una relación entre valores de μ para bifurcaciones sucesivas, que en el límite de un número infinito de doblamientos de periodo converge a un valor, conocido como δ de Feigenbaum, que es *universal*. Esto significa que para toda una amplia familia de mapeos (reglas de evolución), el valor de δ es el mismo. Con esto se está *cuantificando* un comportamiento *cualitativo*.

Pero aún hay más, es *extraordinario* que, motivados por la universalidad, se empezaran a realizar una serie de experimentos en sistemas (por ejemplo, fluidos) que requieren para su descripción de un número infinito de variables (grados de libertad), con el resultado de que la medición de la constante δ corroboró el valor determinado con la logística. Con ello se mostró que algunos aspectos del comportamiento de fenómenos naturales muy elaborados obedecen a reglas de evolución muy simples.

¿Y qué sucede para valores de μ mayores a μ_∞ ? Al aumentar μ se da una sucesión de comportamientos irregulares mezclados con dinámicas periódicas; los primeros corresponden al caos, mientras que las segundas son las llamadas *ventanas*, con comportamiento regular (véase la figura 1). Es más, la constante δ también puede determinarse a partir de la estructura subyacente en el patrón de bifurcaciones en esta zona caótica. En particular para $\mu = 4$ se obtiene un comportamiento equivalente (topológicamente) al de un corrimiento de Bernoulli,¹² el cual se

trayectorias de estrellas en galaxias. Para una presentación de sus contribuciones véase Gleick (1987).

¹² El corrimiento de Bernoulli viene dado por el mapeo $x_{t+1} = 2x_t \text{ mod}[1]$, donde $\text{mod}[1]$ indica

considera prototipo del caos determinista. Cumple con la propiedad de ser una dinámica expansiva que estira distancias, pero que al estar constreñida a un espacio finito (compacto) produce una “revoltura” impresionante (el nombre formal es, de hecho, *mezclado*). Las órbitas del mapeo logístico con $\mu = 4$ presentan un comportamiento estadístico muy semejante al azar. Por ejemplo, el conocimiento de un número finito de puntos de la órbita no permite predecir el siguiente valor; sin embargo, es una dinámica determinista con una regla de evolución. Se tiene entonces un comportamiento aparentemente azaroso con un orden subyacente, un *orden dentro del caos*.

Por supuesto que hallazgos como los anteriores se dan dentro de un contexto histórico. Para fines de los setenta el análisis cualitativo de los sistemas dinámicos se encontraba bastante desarrollado. El estudio de los *atractores* (para nuestros propósitos, éstos son conjuntos a los que converge algún subconjunto de órbitas del sistema dinámico) recibía especial atención.¹³ La línea de pensamiento era que dado que los atractores definen el comportamiento asintótico de la dinámica, el estudio de sus propiedades geométricas, topológicas, de estabilidad (ante condiciones iniciales, global, estructural, etc.) y de evolución ante bifurcaciones, permitiría una clasificación de comportamientos genéricos. Los recorridos entre o hacia los atractores corresponden a transitorios que, como su nombre indica, eventualmente desaparecen.

Los atractores son entes geométricos sumergidos en el espacio de fases. Un punto del espacio de fases determina el estado dinámico del sistema, y cualquier estado dinámico tiene su representación en el espacio de fases. Por ejemplo, para un sistema mecánico de tres partículas el espacio es de dimensión 18, puesto que se requieren tres coordenadas de posición y tres de velocidad para cada una

la operación de quedarse con la parte comprendida entre 0 y 1. Supongamos que se puede determinar una condición inicial para este mapeo con un grado de precisión de 13 cifras en una base binaria, por ejemplo:

$$x_0 = 0.1001101000111$$

Cuando llevamos a cabo una iteración, x_0 se multiplica por 2, lo cual equivale a suprimir el primer dígito en la expresión binaria. Si este proceso lo realizamos 12 veces, el número con el que terminamos es 0.1, y para la treceava iteración tenemos una incertidumbre total, pues desconocemos los dígitos que siguen. Con cada iteración perdemos información sobre el sistema. Esto significa que cualquiera que sea la precisión (finita) de la condición inicial, siempre llegaremos a una situación de total incertidumbre si iteramos la transformación un número suficiente de veces. Con este ejemplo se pone claramente de manifiesto que, a pesar de tratarse de un proceso determinista, el comportamiento asintótico no es predecible, pues para ello se requiere de una precisión infinita en las condiciones iniciales.

¹³ A partir de los trabajos de Smale, durante la década de los sesenta se planteó un programa de clasificación de los sistemas dinámicos. La búsqueda se centró sobre cuál era la clase más general de sistemas con estabilidad estructural (aquellos que ante perturbaciones pequeñas conservan su comportamiento cualitativo). La noción de estabilidad estructural fue introducida en los años treinta por Andronov y Pontryagin. Después de la segunda guerra mundial, S. Lefschetz impulsó el estudio de la estabilidad estructural en Occidente. En un principio se consideraron sistemas con un número finito de comportamientos periódicos, pero luego se pasó a sistemas con un número infinito de comportamientos periódicos. Por un par de décadas este programa de clasificación fue fundamental para el desarrollo de los sistemas dinámicos; sin embargo, eventualmente fue abandonado, en buena medida debido a evidencia numérica en su contra.

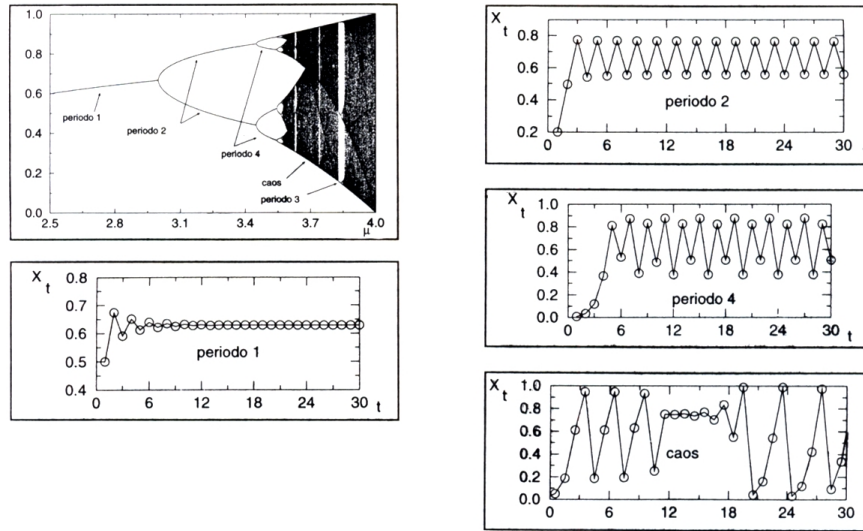


Figura 1: El cuadro superior izquierdo es el diagrama de bifurcaciones del mapeo logístico. Para cada valor del parámetro μ se grafica el atractor del mapeo, o sea, el conjunto entre 0 y 1 al que se retringen los valores del mapeo para tiempos largos. Para valores de μ entre 2.5 y 3 hay un solo valor, que corresponde a una órbita de periodo uno, esto es, pasado el transitorio, las iteraciones subsecuentes no cambian el valor de x ; esto puede verse en el cuadro inferior izquierdo (marcado periodo 1), donde se observa que la evolución en el tiempo del mapeo conduce a un valor fijo después de una decena de iteraciones. Los casos de periodos 2 y 4 están señalados, tanto en el patrón de bifurcaciones como en las gráficas de las órbitas, en dos de los cuadros pequeños. Para el valor $\mu_\infty = 3.569945\dots$ se presenta la transición al caos con la aparición de bandas de valores en el patrón de bifurcación. Para este valor de μ convergen una infinidad de líneas provenientes de la izquierda con una infinidad de bandas provenientes de la derecha. Propiedades de esta convergencia determinan el valor de la constante (universal) δ de Feigenbaum. En la región de bandas, las iteraciones las visitan en forma regular, tomando valores dentro de cada banda en forma aparentemente azarosa. El cuadro último de la derecha muestra una órbita caótica. Las tiras blancas que se observan en el patrón de bifurcación para valores de μ mayores que μ_∞ se conocen como ventanas. En ellas el comportamiento es periódico o intermitente. En la figura se señala la ventana de periodo 3. Nótese la intrincada estructura subyacente en la región caótica (orden dentro del caos).

de ellas. Si los atractores contienen toda la información relevante, la dinámica *de facto* se desarrolla en general en un espacio de dimensión menor que la del espacio fase. Por ejemplo, para una masa puntual sujeta al extremo de un resorte con fricción, con el otro extremo fijo (oscilador armónico amortiguado), las coordenadas del espacio fase son la elongación del resorte y la velocidad con que se desplaza el extremo libre. Como eventualmente se alcanzará el reposo, en este caso el atractor es un punto en el origen, al cual convergen todas las trayectorias describiendo espirales (foco). Si forzamos el resorte en forma armónica, entonces el

atractor es una curva cerrada (ciclo límite), a la cual se converge tanto del interior como del exterior de la curva. Y cuando se tiene una dinámica caótica, ¿cómo se ven los atractores? En 1971 Ruelle y Takens propusieron un modelo, con sensibilidad a condiciones iniciales (Ruelle, 1971), para un flujo turbulento que presentó un atractor con propiedades geométricas muy extrañas, por lo que no tuvieron más remedio que llamarlo *atractor extraño*.¹⁴ El atractor resultó ser un *fractal*.

El concepto de fractal fue introducido por B. Mandelbrot. Un objeto es fractal si mantiene una estructura no trivial en todas las escalas, lo cual equivale formalmente a que su dimensión de Hausdorff sea mayor que su dimensión topológica (la usual), por lo que, en general, se habla de dimensiones no enteras.¹⁵ Esta situación se percibe claramente en la “esponja de Sierpinski” que se muestra en la figura 2. Al ir iterando el algoritmo con el cual se construye la figura, su área tiende a infinito y su volumen a cero. Resulta así un objeto con una dimensión comprendida entre dos y tres. Desde la perspectiva de los fractales esta dimensión queda perfectamente bien determinada; su dimensión fractal (de Hausdorff) es 2.7268.¹⁶

Resulta que la naturaleza está plagada de objetos fractales. Cuando volteen al cielo, y si los IMECAS¹⁷ lo permiten, contemplan la geometría de las nubes y observen cómo se repiten estructuras en todos los tamaños (escalas).¹⁸ Como veremos más adelante, la invariancia ante cambios de escala tiene consecuencias profundas en el comportamiento de los fenómenos naturales; en particular, se registra en el estudio de los fenómenos críticos. En el ámbito de la dinámica, las propiedades fractales no sólo se observan en los atractores. En la figura 1, por ejemplo, queda de manifiesto un reescalamiento del patrón de bifurcaciones (o sea, en la forma en que se suceden cambios cualitativos de la dinámica al modificar los parámetros): al amplificar alguna región de la figura se obtiene un objeto similar a la figura completa.

¹⁴ Con muchos años de antelación (1916) el matemático George David Birkhoff, al estudiar inestabilidades en mecánica celeste, siguiendo el tratamiento geométrico de Poincaré, encontró una curva sorprendente que es probablemente el primer antecesor de los atractores extraños. Es más, en 1948, Levinson mostró que el atractor de Birkhoff se presenta también en el comportamiento de un oscilador forzado en tres dimensiones. A su vez, el trabajo de Levinson estuvo influido por los estudios de Cartwright y Littlewood sobre los experimentos del oscilador de Van der Pol reportados en 1927, en donde se mostraba la generación de subarmónicos al conectar un oscilador armónico con un oscilador de relajación. La cascada de subarmónicos presentaba bandas de ruido al cual prestaron poca atención. ¿Qué hubiera dicho Feigenbaum al respecto?

¹⁵ La dimensión de Hausdorff está relacionada con la dimensión que requieren los elementos de una cubierta (conjunto con un número finito de elementos con ciertas características topológicas que cubre) de un objeto geométrico al tender su tamaño a cero y su número a infinito, de tal manera que el “volumen” del objeto sea finito y distinto de cero. Una presentación rigurosa de la definición de fractal se encuentra en Mandelbrot (1977).

¹⁶ Este es un fractal con autosimilaridad exacta; por construcción, estructuras espaciales idénticas se repiten en todas las escalas. En general, para los objetos fractales, especialmente para los que encontramos en la naturaleza, la autosimilaridad puede ser aproximada. Incluso se habla de multifractales, para los cuales coexisten varias leyes de escalamiento.

¹⁷ Nota para los no chilangos: unidad de medida de la contaminación del aire del Valle de México, sin relación alguna con los chichimecas.

¹⁸ La formalización del concepto fractal ha producido un cambio en la percepción de la naturaleza. La palabra fractal se emplea en casi todas las actividades humanas: arte, ciencia, literatura, cine, etcétera.

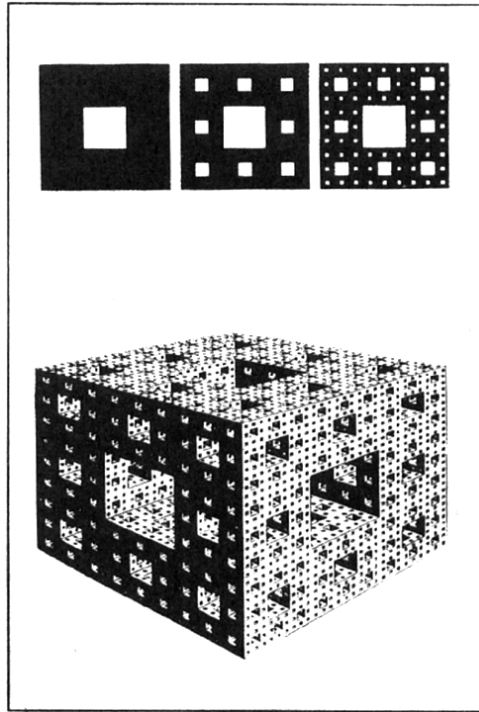


Figura 2: En la parte superior de la figura se muestran los primeros pasos del proceso iterativo mediante el cual se construye la figura inferior, conocida como esponja de Sierpinski. Nótese que al aumentar el número de iteraciones del proceso, el volumen de la esponja tiende a cero, mientras que su superficie crece ilimitadamente. La dimensión fractal (de Hausdorff) de este objeto es 2.7268.

Un factor sobre el que no hemos comentado y que ha permeado continuamente el estudio reciente de los sistemas no lineales es la disponibilidad generalizada de instrumentos de cálculo con capacidades de cómputo insospechables hace dos décadas. Con ello, y con el desarrollo de la electrónica en general, surgen disciplinas nuevas, como las ciencias de la computación y de la informática. Se puede, por ejemplo, hablar de la física computacional como complementaria a la física experimental y a la teórica. En este contexto, la generalidad de la ocurrencia de comportamientos caóticos puesta de manifiesto por simulaciones en computadora es tal que ha modificado radicalmente el rumbo de la investigación de los fenómenos no lineales.

Otra evolución reciente en el estudio de los fenómenos no lineales es la tendencia en algunos medios a vincular ramas del conocimiento basadas en conceptos probabilísticos y estocásticos con otras fundadas en tratamientos determinísticos. Por ejemplo, en el caso de la clasificación de los sistemas dinámicos, el concepto

fundamental de estabilidad estructural propuesto por Smale se ha visto desplazado en ocasiones por el de estabilidad estocástica.¹⁹ Hay un movimiento de fusión.²⁰

Desde el punto de vista epistemológico, la asociación determinismo-predictibilidad, azar-incertidumbre requiere de un análisis más fino.²¹ El determinismo tiene que ver con el comportamiento de la naturaleza; en cambio, la predictibilidad está relacionada con las observaciones, cómputo y análisis que nosotros realizamos. ¿Cómo podemos demostrar que un sistema impredecible es verdaderamente no determinista y que nuestra falta de predictibilidad no se debe a una limitación de nuestras habilidades? Cuando nos referimos al caos, nos movemos en un esquema en donde existe una ley de evolución expresada por una ecuación determinista; la falta de predictibilidad se debe a la incertidumbre ocasionada por la sensibilidad a las condiciones iniciales y no es indicativa de una incertidumbre en la naturaleza. Otro es el caso de un proceso para el cual no hay tal ley de evolución, o, si se llega a tener, es una ley estocástica; en este caso el estado del sistema, a un tiempo dado, especifica únicamente (aun cuando se tuviese la información inicial completa hasta el más mínimo detalle) una distribución de probabilidad para el estado a un tiempo posterior.²²

Una cantidad directamente relacionada con la predictibilidad es el exponente de Liapunov, el cual da una medida promedio –para tiempos largos– de cómo se van alejando órbitas del sistema dinámico que partieron con condiciones iniciales muy cercanas. En un sistema unidimensional, si la diferencia en el punto de partida en el tiempo inicial t_i de dos órbitas cercanas fue ε_i y para un tiempo final t_f es ε_f , el exponente de Liapunov λ se define a partir del límite, cuando $\varepsilon_i \rightarrow 0$, $(t_f - t_i) \rightarrow \infty$, de $\lambda(\varepsilon_i, t_f - t_i, x_i)$ determinado por la expresión $\varepsilon_f = \varepsilon_i \exp[(t_f - t_i)\lambda(\varepsilon_i, t_f - t_i, x_i)]$. El inverso del valor absoluto del exponente de Liapunov determina, por consiguiente, un tiempo característico de la dinámica asintótica. Si λ es negativo, la diferencia entre las dos trayectorias desaparece exponencialmente a lo largo del tiempo y el sistema presenta un atractor. En este caso el tiempo característico opera como un tiempo de relajamiento. Si λ es positivo, las órbitas cercanas se alejan exponencialmente, se presenta la sensibilidad a condiciones iniciales, las incertidumbres iniciales divergen para tiempos largos y se tiene una dinámica caótica. En estas condiciones, el exponente de Liapunov es una medida del tiempo característico que se requiere para que las dos órbitas estén descorrelacionadas, o sea, es una medida del *horizonte de predictibilidad*. Cuanto mayor sea el caos, mayor será λ y menor el horizonte de predictibilidad.²³ El caso $\lambda = 0$

¹⁹ La nueva propuesta es del matemático brasileño Jacob Palis.

²⁰ Un provocativo texto donde se exploran las relaciones entre los sistemas dinámicos, probabilidad, teoría ergódica, informática y lingüística es el de Badii (1997).

²¹ Aquí seguimos algunos planteamientos expresados en Bricmont (1996).

²² Una línea de investigación relacionada con el determinismo, predictibilidad, azar e incertidumbre que más se ha desarrollado recientemente, es la del análisis no lineal de series temporales. El interés parte tanto de su importancia conceptual como por sus aplicaciones. Como ejemplo, consúltese el libro de Weigend (1993).

²³ Cuando el sistema consta de muchos grados de libertad se tiene un espectro de exponentes de Liapunov, el cual se puede relacionar con la dimensión fractal del atractor y en ocasiones con propiedades ergódicas como la entropía de Kolmogorov-Sinai.

es marginal, no hay tiempo característico, pues el inverso de λ tiende a infinito.²⁴ Conviene aquí recalcar la diferencia que mencionamos con anterioridad con una dinámica regida por una ley estocástica. En el caso determinista, la falta de predictibilidad se mide en términos de la divergencia en una incertidumbre inicial, la cual se presenta para tiempos relativamente largos (mayores que el tiempo característico); en cambio, en el caso estocástico, dos realizaciones del sistema con la *misma* condición inicial (incertidumbre inicial nula) podrían estar en dos estados muy distintos, incluso después de un tiempo corto.

En un principio, los estudios sobre caos se realizaron sobre sistemas de baja dimensionalidad. Con el tiempo se ha ido incursionando en casos con muchos grados de libertad; ahora se estudian sistemas espacialmente extensos y se habla de caos espacio-temporal. La tendencia presente es que si bien, en algunos casos, modelos de dimensión muy baja determinan las características esenciales de sistemas con muchos grados de libertad, en general las descripciones más adecuadas se desarrollarán en espacios con una dimensión de tamaño intermedio. Un cambio significativo que puede ocurrir al pasar a los sistemas extensos es que el papel preponderante de los atractores se vea disminuido debido a que con frecuencia los tiempos asociados a los transitorios, entre o hacia los atractores, crecen considerablemente con el tamaño del sistema, llegando a diverger exponencialmente, e incluso hiperexponencialmente con él. Para sistemas de muchos componentes interactuantes en condiciones de criticalidad, como las que se mencionarán más adelante, puede suceder que la evolución se desarrolle esencialmente entre transitorios, sin alcanzarse nunca los estados estacionarios asociados con los atractores. Esta situación se recrudece particularmente cuando se presentan procesos adaptativos para los que los tiempos de evolución de los atractores son menores que los de los transitorios. Se trata, entonces, de procesos con retroalimentación que dan lugar a dinámicas en cambio continuo.²⁵

Al principio de esta sección mencionamos que queda excluida la posibilidad de ejercer un control en situaciones caóticas al no poder predecir el comportamiento dinámico. Contra todo lo esperado, a principios de la década de los noventa se popularizó la noción de *control caótico*. Por medio de procesos de sincronización es posible encadenar la dinámica de un sistema a la de un subsistema caótico. Esto llamó inmediatamente la atención de la comunidad científica relacionada con telecomunicaciones (por ejemplo, con criptografía). Incluso para el control remoto de vuelos espaciales se ha visto que con el aprovechamiento del caos se obtiene un comportamiento más robusto que a partir de dinámicas regulares estables (Shinbrot, 1993a, 1993b; Ditto, 1993).

²⁴ Esta situación marginal de ausencia de escala que se presenta al borde del caos nos la encontraremos más adelante asociada a situaciones de criticalidad.

²⁵ Este tipo de proceso adaptativo empieza a tener repercusión en el modelaje de sistemas sociales, económicos y políticos. Por ejemplo, el economista Brian Arthur menciona lo siguiente: "Con la aceptación de retroalimentaciones positivas, las teorías de los economistas empiezan a considerar a la economía no como simple, sino como compleja, no como determinista, predecible y mecanicista, sino más bien como proceso-dependiente, orgánica y en continua evolución" (Arthur, 1990).

Recapitulemos sobre el contenido de esta sección: comportamientos aparentemente azarosos pueden resultar de evoluciones deterministas; dinámicas no lineales son indispensables para estos comportamientos caóticos; frecuentemente, la no linealidad aparece asociada a procesos de retroalimentación; modelos muy sencillos pueden dar lugar a comportamientos muy complicados que son observables en sistemas con muchos grados de libertad. Al analizar la dinámica de un sistema de baja dimensionalidad, salvo transitorios, la información relevante se encuentra en objetos llamados atractores, con dimensión menor o igual a la del espacio fase. Cuando se tienen sistemas extensos, los transitorios adquieren particular relevancia. Propiedades geométricas de escalamiento de los atractores se traducen en comportamientos dinámicos sofisticados.

Metodológicamente, observamos una convergencia de diversas áreas de especialización: geometría (fractales), sistemas dinámicos, teoría de campos y física estadística, teoría de la medida y probabilidad. Desde el punto de vista epistemológico se tiene una revisión conceptual sobre caos, azar, determinismo, incertidumbre, y adquieren importancia conceptos como universalidad y genericidad.

CRITICALIDAD

Bueno, ¡basta ya del caos! ¿Qué tal si ahora nos enfrentamos a la crisis? Si nos remontamos a los ideogramas chinos, “crisis” tiene el doble significado de *¡peligro y oportunidad!* Si el peligro lo interpretamos como inestabilidad y la oportunidad como un logro sin costo (energía), tenemos precisamente las condiciones de un punto crítico, como los que se estudian en las transiciones de fase. Durante los años setenta el estudio de los fenómenos críticos (por ejemplo, en la transición líquido-gas, o en la ferro-paramagneto) ocupó un sitio preponderante en el área de la materia condensada. Se trata de fenómenos colectivos de muchos componentes fuertemente interactuantes y con correlaciones en todas las escalas. Pensemos en el caso de un metal ferromagnético al que calentamos hasta alcanzar una temperatura (conocida como temperatura de Curie) en que pierde su magnetismo. Un modelo que describe este proceso es el de Ising, donde se considera que en los sitios de una red se encuentra una variable, llamada espín, que sólo puede tomar los valores ± 1 , y que interactúa únicamente con sus vecinos cercanos, favoreciendo su alineamiento. A bajas temperaturas, debido a esta interacción, se forman dominios de espines alineados; el tamaño de los dominios es finito y dentro de cada dominio los espines se encuentran correlacionados.²⁶ Al aumentar la temperatura la interacción se debilita y los dominios se van fraccionando, con el resultado de que la frontera entre dominios crece hasta darse, a la temperatura crítica, una situación en la cual existen dominios intercalados y anidados en todas las escalas. En estas condiciones, el sistema no sólo se encuentra correlacionado a distancia infinita (o

²⁶ Conviene recalcar aquí la diferencia entre la distancia de interacción y la distancia de correlación. La primera es el rango de la interacción física que se está considerando. La segunda es una propiedad estadística. Por ejemplo, dados dos espines, es la distancia de separación para la cual el valor esperado del producto de los dos espines es igual al producto del valor esperado de cada uno. En términos menos formales, es la distancia a partir de la cual un cambio en un espín no afecta al otro espín.

sea, el tamaño del sistema), sino que en todas las escalas hay información física relevante;²⁷ una interacción fuerte de corto alcance produce así un *comportamiento colectivo* con correlaciones a todas las distancias. Este comportamiento de las correlaciones se traduce en que a todas las distancias se tienen *fluctuaciones* y es el efecto combinado de estas fluctuaciones el que produce divergencias en cantidades termodinámicas tales como la susceptibilidad magnética o la capacidad calorífica al aproximarnos a las condiciones críticas. Por ejemplo, la susceptibilidad χ diverge como $|T - T_c|^{-\gamma}$, donde T es la temperatura del sistema, T_c la temperatura crítica y γ el exponente crítico. La particularidad del punto crítico es que, al llegar a él, se presenta una invariancia de escala en la estructura de los dominios magnéticos, esto es, si cambiamos de escala y redefinimos las variables introduciendo una descripción de grano grueso (por ejemplo, un espín efectivo *ad hoc* a la nueva escala de la red), lo que observamos es prácticamente indistinguible de la observación realizada antes del reescalamiento. En 1971, K. Wilson, basándose en sus conocimientos de teoría de campo en el contexto de partículas elementales y en un esquema geométrico de escalamiento propuesto por Kadanoff en 1966, implementó una herramienta de cálculo, conocida como *grupo de renormalización*, con la cual obtuvo valores para los exponentes críticos (como la γ de arriba) que caracterizan las divergencias mencionadas. Todo lo anterior lo pudo llevar a cabo gracias a la invariancia de escala que presenta el fenómeno crítico. Con el grupo de renormalización se demostró que conjuntos de fenómenos naturales con diferencias en el nivel mesoscópico se agrupan en familias de modelos, dando lugar a comportamientos globales macroscópicos caracterizados por los mismos números (los exponentes). El concepto de universalidad quedó entonces firmemente asentado.²⁸

En buena medida, este periodo del desarrollo de la ciencia marcó el rumbo para la investigación futura en el área de los sistemas complejos, tanto desde el punto de vista metodológico como conceptual. En varias áreas del conocimiento se manejaron situaciones similares:

- i) la búsqueda de una cuantificación de comportamientos cualitativos globales (por ejemplo, clasificación de atractores en sistemas dinámicos, comportamientos críticos en sistemas físicos);
- ii) un enfoque sobre propiedades de invariancia de escala (fractales en las formas geométricas, atractores extraños en la dinámica, escalamiento en los fenómenos críticos);

²⁷ Estas últimas palabras casi son el título de la referencia (Wilson, 1979) donde K. Wilson presenta en forma pedagógica su enfoque del estudio de los fenómenos críticos que le valió el Premio Nobel en 1981.

²⁸ El desarrollo de las ideas de universalidad en el contexto de los fenómenos críticos se remonta a los trabajos de Van der Waals a finales del siglo XIX con la introducción de variables reducidas. Otros antecedentes son la ley de estados correspondientes y los escalamientos propuestos a finales de la década de los sesenta, en términos de las singularidades de potenciales termodinámicos por Widom y en términos de funciones de correlación por Kadanoff. La evidencia experimental que se fue acumulando resultó determinante para la formulación de teorías más allá de un campo promedio que incluyesen el efecto de fluctuaciones.

- iii) el desarrollo del pensamiento analógico, que propició el libre tránsito entre disciplinas (la incursión de técnicas propias del estudio de partículas elementales, como el grupo de renormalización, en la física estadística;²⁹ la injerencia de una visión geométrica, como el caso de fractales en atractores; la concepción de los exponentes críticos como dimensiones anómalas), y
- iv) la apertura de un nuevo horizonte por parte de las ciencias computacionales.

Al incursionar en el estudio de los sistemas complejos, la interdisciplinariedad adquiere una nueva dimensión. Por ejemplo, la biología participa en forma preponderante (incluso se ha expresado [Oono, 1998] que la investigación en sistemas complejos *es* la biología): evolución, morfogénesis, inmunología, ecología, neurociencias... todas entran en el ruedo. Se relacionan procesos que se presentan en la meteorología, la astrofísica, la geofísica. Se replantean líneas de investigación y desarrollo en las ciencias sociales y económicas.

Al pasar a los sistemas complejos se transita del equilibrio a los *procesos fuera de equilibrio*,³⁰ en general lejos del equilibrio. En los sistemas en estudio hay flujos de energía, materia, información y/o entropía. Con ello se da la posibilidad de la aparición de una estructura espacial y temporal con la correspondiente funcionalidad. Se habla de *propiedades emergentes*, tales como aprendizaje y autoorganización. Veamos a través de ejemplos específicos algunos de los tratamientos que se han implementado.

INTERDISCIPLINARIEDAD

De pilas de arena y terremotos

Imagínense a un individuo ocioso que enfrente de una mesa decide remontarse a su niñez, cuando en la playa construía pilas de arena. Para ello empieza a depositar granos de arena uno a uno encima de la mesa. Si el fulano, además de ser ocioso está familiarizado con la física, se percatará de que tiene sobre la mesa un sistema dinámico con muchos grados de libertad interactuantes, para el cual una capa plana de arena corresponde a un estado global de equilibrio de mínima energía. En un inicio, aun en la presencia de pendientes pequeñas, al caer un grano de arena, éste

²⁹ El flujo, en ambos sentidos, entre la física estadística y la teoría de campos durante las décadas de los setenta y ochenta fue insólito, enriqueciendo ambas disciplinas. Por ejemplo, el tratamiento de nudos en soluciones poliméricas por medio de teorías de norma tipo Yang-Mills, o la incursión en las teorías de cuerdas de conceptos de la física de polímeros diluidos. El libro de P. G. de Gennes (1979), Premio Nobel 1990, *Scaling Concepts in Polymer Physics*, es un ejemplo de esta tendencia. Véase Martínez Mekler (1981) para una discusión más detallada al respecto.

³⁰ En inglés estos procesos habitualmente se denotan como de "no equilibrio"; hacemos esta aclaración porque de hecho la expresión "no elefantes" fue empleada por Von Neumann al comentar sobre la elaboración de una teoría del "no equilibrio". En este caso, el objetivo era puntualizar que la variedad de fenómenos que se plantearían era tal que la elaboración de una teoría del "no equilibrio", en contraposición a una de equilibrio, sería algo irrealizable. Algunos de los estudiosos de los sistemas complejos consideran que el desarrollo de una teoría de sistemas complejos es un esfuerzo en esta dirección (Bak, 1994). Nota: en "argentino", por supuesto, se utiliza "desequilibrio".

se quedará cerca del sitio donde cayó. Con el tiempo se va formando una pila en la que se dan pequeñas avalanchas, esto es, al caer un grano se producen perturbaciones locales. Eventualmente ocurrirá lo que todos hemos observado, pero quizá no hayamos examinado en detalle: se forma una pila de arena con una pendiente que ¡se mantiene fija! La cantidad de arena depositada en *promedio* se balancea con la que se va cayendo de la mesa. Nuestro ecuánime conocedor de la física se dará cuenta de que lo que tiene ante sí ahora es un estado lejos del equilibrio que es *estadísticamente* estacionario. En estas condiciones se presentan avalanchas de *todos* los tamaños, incluso del tamaño del sistema. Antes de llegar a este estado estacionario, un cambio pequeño en la posición de caída de un grano producía cambios pequeños en la configuración del sistema. En el estado estacionario, la situación es radicalmente diferente: un solo grano de arena puede causar una avalancha que afecte a toda la pila de arena.

¿Qué es lo que está ocurriendo? En 1987, Bak, Tang y Weisenfeld presentaron un modelo para el estudio de la formación de pilas de arena (Bak *et al.*, 1987).³¹ En su simulación, se depositan uno a uno los “granos de arena” en la cima de una pila de arena modelo. Los granos se encuentran formando columnas en los sitios de una red cuadrada. Si la pendiente local, esto es, la diferencia de altura entre columnas vecinas, es suficientemente pequeña, los granos permanecen en su sitio. Si la pendiente local pasa de un cierto umbral, el grano depositado “resbala” y se produce un deslizamiento local. Al “caer” el grano en un sitio más abajo, puede volver a sobrepasar el umbral, con lo que se genera una cascada; en ocasiones, puede suceder que, al moverse, un grano inicie una serie de eventos más arriba. Dependiendo entonces de la configuración de la pila, con la caída de un solo grano de arena pueden producirse avalanchas de todos los tamaños, generadas por pendientes locales por encima de un umbral. Resulta que, para tiempos largos, la pila de arena mantiene fija su pendiente en promedio y que la distribución del tamaño de las avalanchas sigue una ley de potencia, es decir, al graficar el logaritmo del número de avalanchas de un tamaño dado contra el logaritmo del tamaño, se obtiene una recta. En este sentido el fenómeno guarda cierta similitud con un fenómeno crítico, al asociar tamaño de avalancha con tamaño de dominio magnético.

El punto más interesante del proceso es la constancia de la pendiente promedio de la pila; esto se debe a que la dinámica hace que la pila de arena se *autoorganice*. Cuando la pila tiene una pendiente muy pequeña, al agregar arena sólo se presenta uno que otro deslizamiento pequeño, por lo que la pendiente global tiende a aumentar; en cambio, si la pendiente global es muy grande, con frecuencia se dan avalanchas catastróficas que la hacen disminuir. Se llega así, mediante un proceso de *retroalimentación*, a una pendiente intermedia con una estabilidad marginal que balancea los dos efectos. Cuando el sitio de depósito de los granos se escoge al azar, las características azarosas de configuración de la pila se ven multiplicadas por la dinámica, dando lugar a avalanchas de todos los tamaños, pero con claro predominio de las pequeñas (las muy grandes son raras). A diferencia de los procesos caóticos descritos con anterioridad, aquí se conjugan aspectos deter-

³¹ Nuestra presentación sigue el material expuesto por Kadanoff (1991).

ministas (la regla de evolución del sistema) con otros azarosos ligados al entorno. Una característica que el ejemplo pone de manifiesto es la variedad de niveles de organización que se presentan: el grano de arena individual, una avalancha, el comportamiento colectivo de muchas avalanchas. La dinámica local de los granos de arena es muy complicada; en cambio, la descripción del comportamiento estadístico de las avalanchas cerca del estado estacionario sigue leyes de evolución sencillas del tipo ecuación de difusión. Para los distintos niveles de descripción *emergen* distintas “leyes de la naturaleza”.

El problema de las pilas de arena es el prototipo de fenómenos que presentan la llamada *criticalidad autoorganizada*. Éstos son procesos fuera de equilibrio, en los cuales se alcanza un estado estadísticamente estacionario pero *marginamente* estable, en el que pequeñas perturbaciones producen efectos de todos los tamaños. Aparece así una distribución de efectos que presenta invariancia de escala tanto en el espacio como a lo largo del tiempo. Sistemas con estas características se dice que evolucionan *al borde del caos*. Los comportamientos individuales son totalmente impredecibles dada la estabilidad marginal; en este sentido, el horizonte de predictibilidad de un evento específico es cero.³² Sin embargo, si pasamos a otro nivel de descripción para fijarnos en el comportamiento estadístico, por ejemplo, de valores promedio, se observan comportamientos regulares y simples en algunas propiedades de estos sistemas. Tal es el caso de la distribución de la inversa de los intervalos de tiempo (las frecuencias) entre eventos de igual “magnitud”, que para estos sistemas sigue una ley de potencias. Se tiene así una invariancia de escalas en el tiempo, a la que se refiere uno como un comportamiento de tipo $1/f$.³³ En este sentido el proceso es menos “azaroso” que el caos, pues existe una memoria colectiva. Por su generalidad, el formalismo se presta para modelar una gran variedad de sistemas fuera de equilibrio que evolucionan, se adaptan y se autoorganizan.³⁴ La potencialidad de este enfoque rebasa, por consiguiente, el contexto de las ciencias exactas para permitir adentrarnos en las ciencias sociales³⁵ y las humanidades.

Cabe mencionar que parte del éxito de este enfoque se debe a que existen registros de invariancias de escala para los cuales esta perspectiva resulta promisoría. Un caso particular es la relación de Gutenberg y Richter observada en la distribución de los terremotos de acuerdo con su magnitud, la que sigue una ley de potencia a lo largo de ocho décadas. El problema de las pilas de arena es esencialmente el de una dinámica de umbral (carga y descarga) con muchos grados de libertad. De manera análoga, en una falla geológica se van acumulando tensiones

³² Nótese la diferencia de los mecanismos que llevan a un horizonte de predictibilidad cero en este caso, y la situación de una dinámica con exponente de Liapunov $\lambda = 0$, donde “al borde del caos” se refiere a un comportamiento marginal entre regularidad $\lambda < 0$ y evolución de tipo azaroso con $\lambda > 0$.

³³ En general, se observa un comportamiento $1/f^\alpha$ con $\alpha > 0$. En Schroeder (1991) se analizan varios casos.

³⁴ S. Kauffman (1995) propone una alternativa a la evolución darwiniana basada en el concepto de coevolución, que permite un proceso de adaptación con algunos paralelismos con la criticalidad autoorganizada.

³⁵ Véase el artículo “Complexity, contingency and criticality” (Bak, 1995) para una discusión sobre contingencias históricas en términos de criticalidad autoorganizada.

a lo largo del tiempo, que eventualmente generan fracturas, las que se pueden propagar en forma semejante a la de las avalanchas. Esta analogía ha generado una "avalancha" de investigaciones al respecto durante los últimos diez años.

De la turbulencia a los fósiles

A la turbulencia se la ha reconocido como el cementerio de los físicos teóricos. Más de una luminaria del gremio ha fracasado en sus intentos de comprenderla. Heisenberg, uno de los creadores de la mecánica cuántica, propuso una teoría para la turbulencia sin mucho éxito. Poincaré trabajó en hidrodinámica y dio cursos sobre vorticidad, pero nunca se aventuró a proponer una teoría de la turbulencia. Al recibir su Premio Nobel, Feynman comentó que, como estudiante, le propusieron trabajar en electrodinámica cuántica o turbulencia, después de lo cual optó por la salida más fácil, esto es, la electrodinámica cuántica. Kenneth Wilson mencionó a mediados de los setenta que su principal motivación en el desarrollo del grupo de renormalización fue elaborar un formalismo para el estudio de la turbulencia, tarea que seguía inconclusa. No es de extrañar, por consiguiente, que nuestro propósito en estas líneas no sea procurar un entendimiento de la turbulencia, sino más bien establecer algunas analogías entre estudios realizados recientemente sobre turbulencia y su aplicabilidad al análisis de sedimentos lacustres.

En 1941, Kolmogorov propuso una teoría de escalamiento para la turbulencia, basada en propiedades muy generales de isotropía y homogeneidad de flujos turbulentos. Una consecuencia de ese trabajo es la propuesta de que en cierto rango de valores de números de onda (rango inercial), el espectro de potencia de la energía se escala con el número de onda con potencia $-5/3$. Una imagen fenomenológica de la turbulencia propuesta por Richardson la ve como resultado de la coexistencia de remolinos anidados de todos los tamaños, muy al estilo de los dominios magnéticos de los fenómenos críticos que presentamos anteriormente,³⁶ y con una distribución que garantice que el volumen ocupado por cada tamaño de remolino es el mismo. En esta imagen, el análisis de Kolmogorov conduce a que la energía en el fluido es transmitida a lo largo de la jerarquía de remolinos como una cascada y a una tasa constante. Sin embargo, se observan correcciones al escalamiento de Kolmogorov. Una de las explicaciones a esto se basa en el hecho de que las condiciones de homogeneidad e isotropía son alteradas por cadenas de vórtices que perturban el sistema en forma intermitente.³⁷ Bien, y ¿qué tiene que ver todo esto con sedimentos fósiles?

En el estado de Tlaxcala, en México, hace alrededor de un millón de años había una región lacustre inmersa en una zona con mucha actividad volcánica. Estos paleolagos ya no existen, pero se tiene acceso a minas que se escarbaron con el propósito de extraer los sedimentos que contienen restos de algas lacustres de-

³⁶ Un planteamiento reciente de las analogías entre turbulencia, teoría de campos y fenómenos críticos se encuentra en la referencia (Eyink, 1994).

³⁷ Recientemente, por medio de un análisis basado en cadenas de Markov (procesos estocásticos,) en el que estos comportamientos extraños son tomados en cuenta, se han logrado avances en el entendimiento de las correcciones al escalamiento, véase Ugalde (1996).

positados en el Plio-Pleistoceno. Se trata de yacimientos fósiles conformados por caparazones silíceos de diatomeas. Por sus características, estos sedimentos pueden ser utilizados como filtros muy finos y como aislantes térmicos, por lo que tienen interés industrial. Lo espectacular de estas minas es que al adentrarse en ellas se observan muros con patrones en forma de estratificaciones con alternancia entre depósitos de diatomitas (blancos) y depósitos de cenizas volcánicas y arcillas (oscuros). Se tiene así a la mano un catálogo único de la evolución de los paleolagos sujetos a perturbaciones volcánicas (Margalef, 1997). Los lagos tienen ciclos de vida en los que se dan procesos de autoorganización. Al medir la variación de la densidad de los sedimentos sobre transectos en bloques de diatomitas extraídos de las minas, se obtiene una serie espacial relacionada con el tiempo (Vilaclara, 1997), que –se demuestra– da lugar a un espectro de potencia que escala con varias pendientes sucesivas. Surge así la imagen de una evolución propia del lago, que imprime a la estructura de su población características de homogeneidad que son perturbadas por los eventos volcánicos.³⁸ Al analizar con las técnicas desarrolladas para la turbulencia los eventos extraños de las mediciones ecológicas (asociados con la actividad volcánica más violenta), resulta que se puede distinguir un rango de longitudes de onda que corresponde a procesos de relajamiento del lago ante la perturbación externa, que cae precisamente en la zona de escalamiento del espectro de potencia con pendiente de $-5/3$, ¡justamente la de Kolmogorov! ¿Será esto un indicio de una clase de universalidad fundamental? La pregunta queda abierta.

Orden y desorden: evolución, vida y conocimiento

¿Y por qué no? Entrémosle al toro por los cuernos con los complejos y sin complejos. Veamos algunos aspectos de la interrelación del desarrollo embriológico (ordenado y “confiable”) y la evolución mutacional (desordenada y “azarosa”). Las controversias entre los biólogos del desarrollo y los evolucionistas darwinianos llevan varias décadas. El punto de partida es que se supone (y es verdad) que cada mutación genética implica cambios muy pequeños en el fenotipo.³⁹ Por ejemplo, no queda claro cómo un órgano tan complicado como el ojo de un vertebrado pudo haberse formado evolutivamente por medio de una serie muy larga de mutaciones al azar. Si estas mutaciones tuviesen que explorar uniformemente *todo* el espacio fase mutacional⁴⁰ *potencialmente accesible*, el problema sería imposible, pues la probabilidad de llegar al resultado alcanzado en un tiempo finito sería prácticamente nula. Se necesitan mecanismos que limiten el espacio fase a explorar, de manera que la parte limitada incluya la zona prometedora, aquélla con potencial de integrarse fácilmente a las estructuras y procesos del desarrollo embriológico ya presentes.

³⁸ En la analogía que estamos manejando, en lugar de cascadas con flujo de energía se contemplan cascadas con flujo de información, y en lugar de cadenas de vórtices se tienen las erupciones volcánicas.

³⁹ Entendemos por fenotipo las características observables de un organismo, determinadas por la interacción de su constitución genética con el entorno en que se desarrolla.

⁴⁰ Aquí consideramos la evolución como un sistema dinámico para el cual el espacio fase corresponde a todas las posibles realizaciones genéticas.

Una situación similar ocurre al considerar el origen de la vida, la evolución prebiótica y protobiótica. ¿Cómo se pudo pasar en tiempos “razonables” de compuestos inorgánicos y orgánicos relativamente sencillos, primero a moléculas orgánicas complicadas –como son los polímeros biológicos– y posteriormente a células? Si ello fuese fruto del azar, con pocas restricciones, no alcanzaría el tiempo. Esto se volvería aún más difícil para “escenarios fríos”, en donde se supone que algunas de las etapas de la evolución prebiótica habrían tenido lugar a temperaturas muy bajas, en el medio interestelar y en cometas. A esas temperaturas la probabilidad de colisiones térmicas se reduce drásticamente con relación a la de nuestro medio ambiente y la probabilidad de que ocurran síntesis complejas es sumamente baja.

Veamos algunos de los mecanismos de restricción del espacio fase efectivo que se presentan tanto en la evolución prebiótica y protobiótica como en la evolución y funcionamiento de los organismos vivos; es decir, mecanismos que disminuyen drásticamente el tamaño del espacio fase efectivo en que se busca, y que aumentan con ello la probabilidad de asimilación de lo hallado a las estructuras previas. Un punto de partida es reducir las dimensiones del espacio físico en el que se dan los procesos biológicos; por ejemplo, se puede considerar a la célula como un recipiente microscópico de volumen muy pequeño, donde ocurre un conjunto de reacciones químicas más o menos complejas que serían la base de la vida. A pesar de lo pequeño del volumen celular, la probabilidad de que, por choques azarosos entre moléculas, ese conjunto de reacciones tenga lugar con velocidad suficientemente grande a la temperatura ambiente, es prácticamente nula. “Vienen en ayuda” las enzimas, catalizadores biológicos que aceleran reacciones químicas específicas a la temperatura ambiente. Las enzimas son superficies inhomogéneas sobre las cuales tienen lugar reacciones químicas que cuentan con zonas en las que –debido a fuerzas de Van der Waals (fuerzas atractivas de alcance molecular)– los sustratos se acomodan en regiones específicas cercanas, para lo cual llegan incluso a deformarse. Con la proximidad, las reacciones entre dichos sustratos se aceleran. Vemos, pues, que las enzimas disminuyen el espacio efectivo de tres dimensiones (volumen) a dos dimensiones (superficie). La inhomogeneidad de las superficies propicia que haya zonas en que la probabilidad de encontrar los sustratos sea muy grande, con lo cual se tienen restricciones adicionales a la bidimensionalidad de la superficie de las enzimas. Sin embargo, ésta no es toda la historia, pues procesos celulares importantes tienen lugar en espacios aún más restringidos. Tal es el caso de la replicación y transcripción genéticas, así como el de la síntesis de proteínas en el ribosoma celular, donde se trata de procesos básicamente cuasiunidimensionales que tienen lugar a lo largo de un canal o filamento y que, además, son, en general, unidireccionales. Para estos procesos operan “máquinas” que transfieren materia, energía e información en escalas moleculares. A las temperaturas a que tienen lugar los procesos biológicos en la Tierra, las fluctuaciones térmicas son importantes, por lo que se dice que trabajan en el régimen browniano.⁴¹ Aparecen así máquinas

⁴¹ Recientemente el estudio de las nanomáquinas ha recibido especial atención principalmente por su relevancia en la biología y en la electrónica. En el llamado régimen browniano (Magnasco, 1993), las fluctuaciones térmicas contribuyen al transporte de la máquina (no pueden ser tratadas como una

moleculares, para las que consideraciones tanto mecánicas como termodinámicas son importantes, que trabajan a lo largo de espacios cuasiunidimensionales, en general, de modo unidireccional.

Existen teorías de la evolución prebiótica y protobiótica en las que algunos de los procesos fundamentales tendrían lugar en escenarios extraterrestres, como el medio interestelar o en cometas, a lo largo de filamentos y canales microscópicos, presentes en ambos casos. Dado que en esos cuerpos las temperaturas son muy bajas (alrededor de los 10 K), en tales escenarios la mecánica y el electromagnetismo (por ejemplo, “motores” impulsados por radiación electromagnética polarizada de pulsares) son fundamentales, mientras que la termodinámica desempeña un papel secundario.

Un rasgo interesante de la fisicoquímica de la dinámica de polímeros biológicos, tales como las proteínas y los ácidos nucleicos, es que, a temperatura ambiental y en solución acuosa, la contribución energética de la entropía casi cancela la de la entalpía,⁴² por lo que están en condiciones características de una zona crítica (fluctuaciones con bajo costo energético) que permite flexibilidad y facilidad de asociación y disociación (Petruska, 1995). Al constreñir el polímero en la superficie de una enzima en procesos como la replicación, la reducción dimensional disminuye la contribución entrópica, y la entalpía de enlace se vuelve dominante, por lo que los procesos de apareamiento se vuelven más precisos. Vemos entonces que las restricciones espaciales también intervienen en la mejora de aspectos funcionales.

Otro aspecto de la interrelación entre el desarrollo embrionario y la evolución genética está asociado con los llamados genes homeóticos, para los cuales una mutación puede ocasionar modificaciones drásticas, como el que una mosca tenga una pata o un ala en el lugar donde debiera localizarse una antena. Se ha observado un alto grado de universalidad en muchos de estos genes, ya que están presentes en organismos tan diversos como la mosca o el hombre, pero con funciones muy similares, aunque en general no idénticas. Este comportamiento sugiere la presencia de procesos modulares asociados a estos genes, y que el modo de montaje y la sincronización temporal son factores importantes en muchos de los aspectos del desarrollo embrionario. Por lo que tal “montaje modular” puede verse como otro mecanismo para reducir el espacio fase efectivo en que tiene lugar la evolución biológica. Vale la pena hacer notar que, asociado a lo anterior, actualmente existe la confianza de que se está cerca de una síntesis de las dinámicas del desarrollo embrionario y de la evolución, al grado que se ha acuñado el término *evo-devo* (Pennisi, 1997), de las primeras sílabas de las palabras inglesas *evolution* (evolución) y *development* (desarrollo).

Todo lo anterior sugiere que la naturaleza no es un artífice inteligente y genial que dispone de un número infinito de posibilidades para realizar obras de arte biológicas casi perfectas; sino más bien dispone de un número limitado de herra-

pequeña perturbación) cuando existe una fuente de asimetría en el problema (por ejemplo, en un potencial o en un forzamiento).

⁴² La entropía es una medida del grado de desorden del sistema; la entalpía en este caso es una energía de amarre entre moléculas.

mientas y métodos, está sujeta a muchas restricciones y resuelve los problemas como buenamente puede, combinando de modo adecuado lo que tiene. Quizá la presencia de tales limitaciones haga que la vida sea más fácil de comprender que lo que parecería a primera vista, aunque es de admirar que con tales restricciones la evolución biológica haya sido capaz de llegar a algo tan complejo como es el cerebro humano.

Otro aspecto que guarda relación con lo anterior y que vale la pena comentar es la importancia de la asimilación del desorden al orden en el aprendizaje. La búsqueda de cosas y aspectos nuevos es en general desordenada y sorprendente, aunque lo nuevo debe tener la posibilidad de asimilarse a las estructuras y estrategias presentes (algo similar a la integración armónica de las fluctuaciones mutacionales en los procesos dinámicos del desarrollo embrionario). Como comenta Asimov (1993), el perro es más inteligente que el gato: "El perro, en sus momentos de ocio, olfatea acá y allá, elevando sus orejas al captar sonidos que nosotros no somos capaces de percibir; y precisamente por esto lo consideramos más inteligente que el gato, el cual, en las mismas circunstancias, se entrega a su aseo, o bien se relaja, se estira a su talante o dormita." ¡Guau! Es precisamente en la curiosidad y capacidad de asombro, asociado a una dosis de escepticismo, y la capacidad de poner a prueba lo que ese asombro sugiere, donde, según Carl Sagan (1998), debemos buscar el fundamento de la ciencia.

Henri Atlan también ha discutido aspectos de la "asimilación armónica" del orden y el desorden por el cerebro humano. En su enfoque (Atlan, 1990) el consciente sería básicamente una base de datos ordenada, mientras que el inconsciente –que operaría de modo desordenado– sería el principal responsable de la creación, siendo fundamental el equilibrio entre los dos aspectos. Este equilibrio permitiría la asimilación de lo encontrado por el inconsciente desordenado y creador, a las metodologías y bases de datos asociadas al consciente. Aunque se trata de un enfoque que habría que analizar críticamente, es una muestra del potencial que contiene el estudio de los sistemas complejos en diversas áreas.

REFLEXIONES

Durante las últimas dos décadas se han roto barreras y abierto horizontes del conocimiento. Las metodologías, los formalismos y las técnicas desarrolladas permiten abordar situaciones previamente prohibitivas. Del equilibrio se transita al cambio continuo y la adaptación se integra a la evolución. Experiencias disímiles, de ámbitos ajenos, se entrelazan en una cruzada interdisciplinaria. Apertura y convergencia se funden. Se gesta otra forma de hacer ciencia. Baluartes del conocimiento como la evolución darwiniana y la relojería newtoniana son nuevamente cuestionados y reconsiderados. Contraposiciones que regularmente asaltan la historia vuelven a un ruedo de debate intenso: localidad-globalidad, cantidad-cualidad, mecanismo-proceso, determinismo-azar.

En este torbellino de acontecimientos se presenta, a nuestro parecer, un reto fundamental: la consecución de la *síntesis* entre lo particular y lo genérico, la con-

formación de un escenario para el encuentro entre mecanismos particulares, reflejos del detalle, y procesos regidos por principios y leyes genéricas. En el pasado, situaciones de esta naturaleza han forjado puentes, como es la mecánica estadística. Ahora, el planteamiento trasciende la comunidad científica, al ser de interés directo y de consecuencia inmediata para amplios sectores de la sociedad.

¿Será que con el estudio de los sistemas complejos nos adentramos a una “superrevolución del conocimiento”? ¿Será que nos encontramos ante un cambio de paradigma equivalente al que tuvo lugar en el Renacimiento? Dejemos que eso lo decida la historia. Y, por lo pronto, volvamos al inicio de este escrito y disfrutemos.

Estamos ante la posibilidad de asomarnos a la filosofía natural de otros tiempos, ahora con la visión de nuestros tiempos. Nos encontramos al borde del milenio, en el umbral de la *gran aventura*.

AGRADECIMIENTOS

Ante todo queremos expresar un múltiple agradecimiento a Luis de la Peña, por habernos dado la oportunidad de participar en este libro, por haber leído con detenimiento el manuscrito y compartido con nosotros sus puntos de vista que mejoraron sustancialmente el texto, y por último, por haber desplegado una paciencia y perseverancia loable que permitió que este trabajo pasara a ser una realidad. También estamos en deuda con Maximino Aldana y Gloria Vilaclara, quienes en una demostración de amistad, revisaron, comentaron y enriquecieron el manuscrito con sus atinados comentarios y sugerencias. Por supuesto, el contenido de lo expuesto es responsabilidad nuestra.⁴³

BIBLIOGRAFÍA

- Arthur, B. (1990), “Positive feedbacks in the economy”, *Scientific American*, pp. 80–85.
- Asimov, I. (1993), *Nueva guía de la ciencia. Ciencias físicas*, Barcelona, RBA Editores, p. 662.
- Atlan, H. (1990), *Entre el cristal y el humo: ensayo sobre la organización de lo vivo*, Madrid, Debate, p. 303.
- Badii, R. y A. Politi (1997), *Complexity, hierarchical structures and scaling in physics*, Cambridge, Cambridge University Press, p. 318.
- Bak, P., C. Tang y K. Wiesenfeld (1987), “Self-organized criticality. An explanation of $1/f$ noise”, *Physical Review Letters*, vol. 59, p. 381.
- Bak, P. y M. Paczuski (1995), “Complexity, contingency, and criticality”, *Proceedings of the National Academy of Science*, vol. 92, pp. 6689–96.
- Barrow-Green, J. (1997), “Poincaré and the three body problem”, *History of Mathematics*, vol. 11, American Mathematical Society y London Mathematical Society.
- Bricmont, J. (1996), “Science of chaos or chaos in science?”, *Annals of the New York Academy of Science*, vol. 775, pp. 131–175.
- Briggs, J. y F. D. Peat (1990), *Espejo y reflejo: del caos al orden*, Barcelona, Gedisa, p. 222.

⁴³ Para cualquier queja sobre el decrepito sentido del humor, favor de dirigirse a GMM.

- De Gennes, P-G. (1979), *Scaling concepts in polymer physics*, Nueva York, Ithaca, Cornell University Press, p. 324.
- Diacu, F. y P. Holmes (1996), *Celestial encounters: The Origins of Chaos and Stability*, Princeton, Princeton University Press.
- Ditto, W. L. y L. M. Pecora (1993), "Mastering chaos", *Scientific American*, pp. 78–84.
- Eyink, G. y N. Goldenfeld (1994), "Analogies between scaling in turbulence, field theory and critical phenomena", *Physical Review E*, vol. 50, p. 4676.
- Feigenbaum, M. J. (1978), "Quantitative universality for a class of non-linear transformation", *Journal of Statistical Physics*, vol. 19, p. 25.
- Gell-Mann, M. (1992), "Complexity and complex adaptive systems", J. Hawkins y M. Gell-Mann (coords.), *The evolution of human languages. SFI Studies in the Sciences of Complexity, Proceedings*, vol. 10, Reading Mass, Addison-Wesley, pp. 3–18.
- Glandsdorff, P. e I. Prigogine (1971), *Thermodynamic theory of structure, stability and fluctuations*, Londres, Wiley-Interscience, p. 306.
- Gleick, J. (1987), *Chaos: Making a new science*, Nueva York, Viking Penguin Inc., p. 352.
- Grassberger, P. (1991), "Randomness, information and complexity", F. Ramos-Gómez (coord.), *Proceedings of the Fifth Mexican School on Statistical Physics*, Singapur, World Scientific, pp. 57–99.
- Haken, H. (1978), *Synergetics, an introduction*, Berlín, Springer-Verlag, p. 355.
- Kadanoff, L. P. (1991), "Complex structures from simple systems", *Physics Today*, vol. 44, núm. 3, p. 9.
- Kauffman, S. (1995), *At home in the universe. The search for the laws of self-organization and complexity*, Oxford, Oxford University Press.
- Kellert, S. H. (1993), *In the wake of chaos*, Chicago, Chicago University Press, p. 176.
- Lorenz, E. (1963), "Deterministic Nonperiodic Flow", *Journal of Atmospheric Sciences*, vol. 20, pp. 130–141.
- Magnasco, M. (1993), "Forced thermal ratchets", *Physical Review Letters*, vol. 71, pp. 1477–81.
- Mandelbrot, B. B. (1977), *Fractals, form, chance and dimension*, San Francisco, W. H. Freeman and Company, p. 365.
- Margalef, R. (1997), "Our Biosphere", *Excellence in Ecology*, vol. 10, Ecology Institute, Alemania, Oldendorf-Luhe, 176.
- Martínez Mekler, G. (1981), "Polímeros, un tema de confluencia en la física", *Ciencias Revista de Difusión*, UNAM, vol. 4, p. 18.
- Martínez Mekler, G. (1993), "Dinámica y estructura de sistemas complejos", en L. García-Colín, F. Ramos Gómez y R. Rechtman (coords.), *Temas Selectos de Física Estadística*, México, El Colegio Nacional, pp. 141–227.
- May, R. (1976), "Simple mathematical models with very complicated dynamics", *Nature*, vol. 261, pp. 459–467.
- Oono, Y. (1998), "Complex systems study as biology", *International Journal of Modern Physics B*, vol. 12, 245.
- Pennisi, E. y R. Wade (1997), "Developing a new view of evolution", *Science*, vol. 277, pp. 34–37.
- Peterson, I. (1993), *Newton's clock: Chaos in the solar system*, Nueva York, W. H. Freeman.
- Petruska, J. y M. F. Goodman (1995), "Enthalpy-entropy compensation in DNA melting thermodynamics", *The Journal of Biological Chemistry*, vol. 270, pp. 746–750.

- Poincaré, H. (1909), *Science et méthode*, París, E. Flammarion, p. 314 (trad. al español: Espasa-Calpe).
- Ruelle, D. (1991), *Chance and chaos*, Princeton, Princeton University Press, p. 195.
- Ruelle, D. y F. Takens (1971), "On the nature of turbulence", *Communications in Mathematical Physics*, vol. 20, pp. 167–192.
- Sagan, C. (1998), *El mundo y sus demonios*, México, Planeta.
- Schroeder, M. (1991), *Fractals, chaos, power laws: minutes from an infinite paradise*, Nueva York, W. H. Freeman, pp. 429.
- Shinbrot, T., C. Grebogi, E. Ott y J. A. Yorke (1993a), "Using small perturbations to control chaos", *Nature*, vol. 363, pp. 411–417.
- Shinbrot, T. (1993b), "Chaos: unpredictable yet controllable?", *Nonlinear Science Today*, vol. 3, núm. 2, pp. 1–8.
- Smale, S. (1967), "Differentiable Dynamical Systems", *Bulletin of the American Mathematical Society*, vol. 73, pp. 747–817.
- Tresser, C. y P. Coullet (1978), "Itérations d'endomorphisme et groupe de renormalisation", *Compte-rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, vol. A287, p. 577.
- Ugalde, E. (1996), "Self-similarity and finite-time intermittent effects in turbulent sequences", *Journal of Physics A*, vol. 29, pp. 4425–43.
- Vilaclara, G. (1997), *Registro de erupciones volcánicas en las diatomitas lacustres de Tlaxcala, México*, Tesis de doctorado en ciencias biológicas, España, Universidad de Barcelona, Facultad de Biología.
- Weigend, A. S. y N. A. Gershenfeld (1993), "Time series prediction: Forecasting the future and understanding the past", *SFI Studies in the Sciences of Complexity, Proceedings*, vol. 15, Reading, Mass., Addison-Wesley, p. 643.
- Weinberg, S. (1992), *Dreams of a final theory*, Nueva York, Pantheon Books, p. 334.
- Wilson, K. (1979), "Problems in physics with many scales of length", *Scientific American*, vol. 241, agosto, p.158.

LECTURAS RECOMENDADAS

A continuación se da una lista de textos y libros de divulgación con algunos comentarios.

Caos y sistemas dinámicos

- Baker, G. L. y J. P. Gollub (1990), *Chaotic Dynamics*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Bergé, P., Y. Pomeau y Ch. Vidal (1988), *L'ordre dans le chaos*, París, Hermann.
- Briggs, J. y F. D. Peat (1990), *Espejo y reflejo: del caos al orden*, Barcelona, Gedisa.
- Davies, P. D. (1989), *The new physics*, Cambridge, Cambridge University Press (variedad de temas).
- Gleick, J. (1994), *Caos-La creación de una ciencia*, Barcelona, Seix Barral, p. 358 (periodismo científico de excelencia).
- Jackson, A. E. (1989), *Perspectives of nonlinear dynamics*, vol. 1, Cambridge, Cambridge University Press, p. 633.

- Jackson, A. E. (1991), *Perspectives of nonlinear dynamics*, vol. 2, Cambridge, Cambridge University Press.
- Kaplan, D. y L. Glass (1995), *Understanding nonlinear dynamics*, Nueva York, Springer-Verlag, p. 420. (Texto orientado a biólogos.)
- Kellert, S. H. (1993), *In the wake of chaos*, Chicago, Chicago University Press, p. 176. (Tratamiento histórico-filosófico).
- Lorenz, E. N. (1995), *La esencia del caos*, Madrid, Debate, p. 232.
- Stewart, I. (1989), *Does God play dice?*, Cambridge, Blackwell, p. 348.

Sistemas complejos

- Bak, P. (1996), *How nature works: the science of self-organized criticality*, Nueva York, Copernicus.
- Gell-Mann, M. (1995), *El quark y el jaguar*, Colección Matemáticas, Barcelona, Tusquets, p. 413.
- Goldberg, D. E. (1989), *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison-Reading Mass, Wesley Publishing Co., p. 412.
- Goodwin, B. (1994), *How the leopard changed its spots. The evolution of complexity*, Nueva York, Touchstone.
- Kauffman, S. (1995), *At home in the universe. The search for the laws of self-organization and complexity*, Oxford, Oxford University Press.

Otros temas

- Atlan, H. (1990), *Entre el cristal y el humo: ensayo sobre la organización de lo vivo*, Madrid, Debate, p. 303.
- Sagan, C. (1998), *El mundo y sus demonios*, México, Planeta.

En la colección "La Ciencia desde México", Fondo de Cultura Económica:

- Braun, E. (1996), *Caos, fractales y cosas raras*, núm. 150.
- Schifter, I. (1996), *La ciencia del caos*, núm. 142.
- Talanquer, V. (1996), *Fractus, fracta, fractal. Fractales, de laberintos y espejos*, núm. 147.

Artículos en revistas

Ciencia y Desarrollo, Conacyt:

- Martínez, R. y R. Bulajich (1993), "Caos: memoria antigua, realidad moderna".

Ciencias, Revista de difusión, UNAM:

- González, H. y H. Arce (1996), "El caos, un intento por dar sentido a la realidad", vol. 43, pp. 4-11.
- Esteva, L. (1985), "Matemáticas y caos", vol. 8, pp. 8-13.
- Martínez Mekler, G. (1981), "Polímeros, tema de confluencia en la física", vol. 4, pp. 18-24.
- Rechtman, R. (1991), "Una introducción a autómatas celulares", vol. 24, pp. 23-29.

Mundo Científico

- "La ciencia del caos", vol. 11, núm 115 (número especial dedicado al caos).

Physics Today:

- Anderson, P. W. (1991), "Is complexity physics? Is it science? What is it?", vol. 44, p. 9.
Chernikov, A. A., R. Z. Sadeev y G. M. Zaslavsky (1988), "Chaos: How regular can it be?", vol.41, p. 27.
Ford, J. (1983), "How random is a coin toss?", vol. 36, p. 40.
Hopfield, J. (1994), "Neurons, dynamics and computation", pp.40–46.
Kadanoff, L. (1983), "Roads to chaos", vol. 36, p. 46.

Revista de la Universidad de México:

- Pérez Pascual, R. (1989), "El caos determinista: los límites de la predicción científica", vol. 463, pp. 19–22.
Pérez Pascual, R. (1996), "Física, causalidad, determinismo, azar y caos", vol. 540, pp. 47–51 (número centrado en el tema del caos).

*Scientific American:*⁴⁴

- Arthur, B. (1990), "Positive feedbacks in the economy", pp. 92–99.
Bak, P. y K. Chen (1991), "Self-organized criticality", pp. 46–53.
Crutchfield, P., J. D. Farmer, N. H. Packard y R. Shaw, (1986), "Chaos", vol. 225, p. 38.
Holland, J. H. (1992), "Genetic Algorithms", julio de 1992, pp. 66–72.
Kauffman, S. (1991), "Antichaos and adaptation", vol. 230, pp. 78–84.
Solé, R. V., J. Bascompte, J. Delgado, B. Luque y S. Manrubia (1996), "Complejidad en la frontera del caos", núm 236, pp. 14–21.
Wilson, K. (1979), "Problems in physics with many scales of length", vol. 241, pp. 158–179.

Existen varias series especializadas de libros sobre el tema. Entre ellas podemos citar:

- Spinger Series in Synergetics, Berlín (1976 en adelante).
Santa Fe Institute, Studies in the Sciences of Complexity, California, Redwood, Addison-Wesley, Lectures volumes (1989 en adelante).
Santa Fe Institute, Lecture notes volumes (1990 en adelante).
Santa Fe Institute, Reference volumes (1992 en adelante).
Santa Fe Institute, Proceedings volumes (1990 en adelante).

⁴⁴ Los artículos en inglés aparecen tres meses después en su versión en español en la revista *Investigación y Ciencia*.

LA VIDA... ¿SE ORIGINÓ EN LA TIERRA?*

EL problema del origen de la vida ha inquietado al ser humano prácticamente desde que éste tomó consciencia de estar vivo. Es una inquietud que va más allá de la mera curiosidad; entender nuestros orígenes, de dónde venimos y por qué somos, puede ayudar a vislumbrar nuestro futuro: hacia dónde vamos y qué seremos.

AQUÍ MISMO

A lo largo de nuestra historia, se han dado múltiples explicaciones al origen de la vida, que varían en cada época y cultura, y van desde lo mitológico hasta lo científico. Sin embargo, aun cuando algunas pueden ser contradictorias, la mayoría tiene un aspecto en común: en general, se asume que la vida se originó en la misma Tierra. Por alguna razón, nos hemos sentido más cómodos suponiendo que nuestros orígenes tuvieron lugar aquí mismo, en nuestra propia casa. Por ejemplo, casi todas las corrientes mitológicas y religiosas asumen que “los cielos” están dominados por los dioses, mientras que la Tierra es el lugar destinado a “los mortales”, ya sean plantas, animales o seres humanos, y que tales mortales fuimos “creados” aquí desde el principio.

Esta tendencia de suponer, o mejor dicho, de asumir que la vida en la Tierra se originó aquí no es particular de la religión o la mitología, también ha penetrado en las ideas científicas antiguas y modernas, a tal grado que se le ha dado un nombre: se le conoce como hipótesis endógena. Por ejemplo, en la década de los años treinta, A. I. Oparin en Rusia y J. B. S. Haldane en Inglaterra propusieron, cada uno por su cuenta, un escenario en el que las primeras moléculas orgánicas útiles para la vida se crearon en la superficie de la Tierra a partir de compuestos de carbono y nitrógeno relativamente simples. De acuerdo con el modelo de Oparin y Haldane, estos compuestos orgánicos adquirieron cada vez mayor complejidad, y eventualmente evolucionaron para dar origen a los primeros organismos unicelulares, en los mares primitivos de la Tierra.

* Artículo escrito por Maximino Aldana, Germinal Cocho y Gustavo Martínez Mekler. Publicado en la revista *¿Cómo ves?*, no.23, octubre de 2000, pp.10-18. México: DGDC, UNAM.

MENSAJE EN UNA BOTELLA

Años más tarde, las ideas de estos dos investigadores inspiraron a S. L. Miller y H. C. Urey de la Universidad de Chicago, a realizar un experimento en el que simulaban las condiciones primitivas de la Tierra en una botella de vidrio. Miller y Urey depositaron en la botella diversos compuestos simples como amoníaco, hidrógeno, agua y algunos otros, e irradiaron la mezcla con luz ultravioleta y rayos X, los cuales se suponía que existían en la superficie de la Tierra primitiva debido a la ausencia de oxígeno en la atmósfera. El resultado de este experimento fue sorprendente, ya que después de un tiempo se obtuvieron moléculas orgánicas complicadas, como algunos aminoácidos y bases nitrogenadas que son fundamentales para los organismos vivos. De esta manera, Miller y Urey mostraron que era perfectamente posible obtener moléculas orgánicas complejas a partir de compuestos químicos sencillos con relativa facilidad, lo cual representó una especie de confirmación de las ideas de Oparin y Haldane.

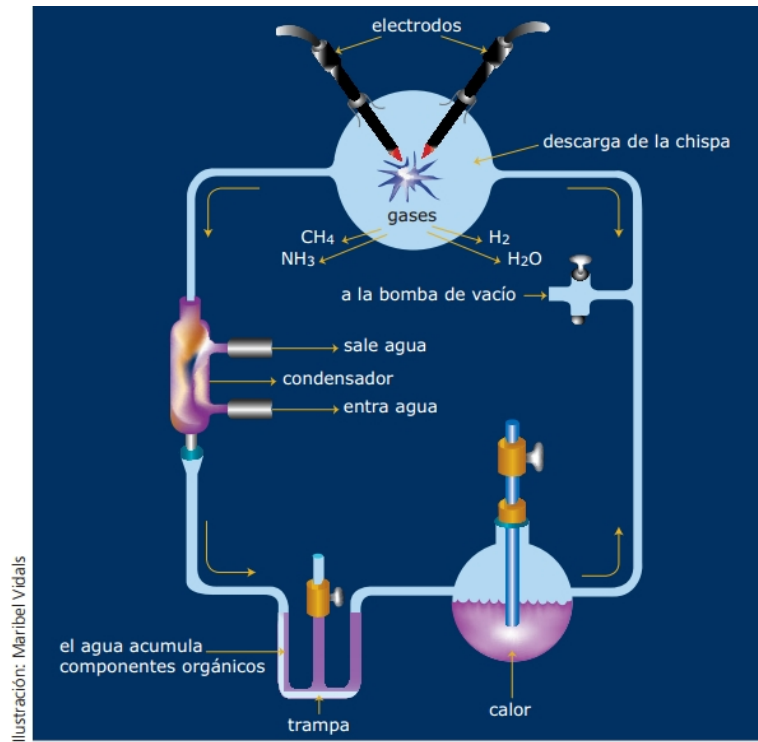


Figura 1: El experimento de Stanley Miller, 1950. Descarga de una chispa eléctrica en una mezcla que él pensaba era semejante a la composición primordial de la atmósfera. En un recipiente de agua, diseñado para ser un modelo de un océano antiguo, aparecieron aminoácidos.

Este histórico experimento marcó un hito en el desarrollo de las teorías sobre el origen de la vida, ya que posteriormente muchos otros investigadores realizaron experimentos similares, aunque más sofisticados, para producir moléculas orgánicas más complicadas y en mayores cantidades que las que obtuvieron Miller y Urey, pero siempre con la idea de obtenerlas a partir de compuestos sencillos que se encontraran bajo condiciones físicas y químicas similares a las que prevaletían en la Tierra primitiva. En otras palabras, tanto Oparin y Haldane, como Miller y Urey, y muchos otros investigadores que les siguieron, han asumido que la vida en la Tierra se originó en la misma Tierra.

Solamente algunos escritores de ciencia ficción, y algunos científicos arriesgados (como Fred Hoyle), habían imaginado que los primeros procesos biológicos que eventualmente condujeron a los seres vivos, pudieron haberse llevado a cabo afuera, es decir, en el espacio exterior. Sin embargo, hasta antes de la década de 1980, estas ideas no habían sido más que especulaciones sin fundamento. Pero en los últimos veinte años se ha acumulado evidencia que sugiere que los primeros procesos que originaron la vida en la Tierra no se dieron aquí mismo, sino que tuvieron lugar fuera de nuestro planeta. Pero antes de que discutamos las razones por las que se cree que la vida pudo haberse originado en el espacio exterior y los aspectos a favor y en contra de esta nueva hipótesis, debemos definir qué entendemos por "origen de la vida".

LA INFORMACIÓN NECESARIA

Las unidades básicas de la vida son las células, ya que son los organismos vivos más pequeños a partir de los cuales todos los demás estamos contruidos. Las células están compuestas, a su vez, por diferentes tipos de moléculas, por ejemplo, los azúcares, que conforman la reserva energética, o los ácidos grasos (fosfolípidos) que sirven para construir la membrana celular. Hay dos tipos de moléculas que desempeñan un papel fundamental dentro de la maquinaria celular: las proteínas y los ácidos nucleicos. Las proteínas son los "obreros" celulares, es decir, son las moléculas encargadas de llevar a cabo todas las funciones metabólicas de la célula. Hay proteínas que se encargan de transportar oxígeno, que dirigen la construcción de membranas, que introducen nutrientes a la célula; otras degradan estos nutrientes extrayendo la energía química requerida, y otras más expulsan los desechos fuera de la célula. En fin, las proteínas son las encargadas de realizar, de manera orquestada y organizada, todo el trabajo celular.

Por otro lado, los ácidos nucleicos, el ADN y el ARN, contienen la información genética del metabolismo celular. Es decir, en estas moléculas se almacena la información de todas las proteínas que requiere la célula para subsistir. Cuando decimos, por ejemplo, que el ADN contiene la información del color de los ojos de las personas, a lo que nos referimos es a que en el ADN está contenida la información de las proteínas que le dan el color a los ojos. Esta información se pasa íntegramente de la célula madre a las células hijas en la división celular, lo que hace que se conserven las características genéticas de la especie. Las proteínas son funda-

mentales para que esto ocurra, ya que participan activamente en la replicación de la célula, suministrando, transportando y degradando todos los nutrientes químicos necesarios para la replicación, y acelerando reacciones químicas metabólicas que de otra forma no podrían realizarse.

La interrelación entre ácidos nucleicos y proteínas es muy estrecha y complicada. En el ADN y ARN está la información para construir a las proteínas, y a su vez las proteínas son fundamentales para la conservación y replicación del ADN y del ARN. Al parecer, sin proteínas, los ácidos nucleicos no se pueden construir ni mucho menos replicar y, sin ácidos nucleicos, la célula no cuenta con la información para fabricar las proteínas que necesita para estar viva.

EL MEOLLO DE LA VIDA

Bajo esta perspectiva, el problema del origen de la vida consta de dos partes: Primero, ¿de qué manera se originaron moléculas orgánicas complicadas, como las proteínas y los ácidos nucleicos, a partir de compuestos de carbono, nitrógeno e hidrógeno relativamente sencillos? Y, segundo, ¿cómo se llegó a esa interrelación tan estrecha entre ácidos nucleicos y proteínas que le permite a la célula subsistir y replicarse?

El meollo del problema del origen de la vida radica en contestar estas dos preguntas. Vemos entonces que no estamos tratando de explicar cómo surgieron seres tan complejos como los dinosaurios o los tigres dientes de sable. Ni siquiera estamos tratando de explicar el origen de las células, las cuales ya de por sí son sistemas muy complejos y organizados, en los que muchas partes están interactuando unas con otras sin que sepamos bien a bien cómo lo hacen.

El origen de la vida tiene que ver con los primeros procesos físicos y químicos que eventualmente condujeron a las células. Estos procesos pueden clasificarse en dos tipos: el primero consiste en los procesos encargados de la formación de moléculas complejas a partir de moléculas sencillas (primera pregunta), y se llaman procesos prebióticos; ya Miller y Urey nos dieron algunas pistas de cómo se llevan a cabo. El segundo tipo de procesos son los que conducen a la interrelación entre proteínas y ácidos nucleicos, los que le permiten a la célula realizar todas sus funciones metabólicas de subsistencia y replicación (segunda pregunta), y se conocen como procesos protobióticos.

Cuando decimos que hay evidencia de que la vida se originó en el espacio exterior, a lo que nos referimos es a que se ha descubierto que tanto los procesos prebióticos como los procesos protobióticos ocurren en superficies cometarias, en meteoritos y en polvo interestelar. Esta evidencia de ninguna manera significa que existen "marcianos" con inteligencias super desarrolladas, civilizaciones con tecnologías más avanzadas que la nuestra o cosas por el estilo.

LAS PRIMERAS PISTAS

En 1864 cayó un meteorito en el pueblo de Origueil, cerca de Mounauban, Francia. Éste era particularmente extraño por su alta concentración de carbono y arcilla, lo que indujo a los geoquímicos a realizar análisis muy cuidadosos sobre su composición química. En 1963, I. R. Kaplan raspó un poco de polvo de la superficie del meteorito y lo analizó, encontrando una multitud de aminoácidos que, hasta entonces, se consideraban particulares de los organismos vivos (los aminoácidos son las moléculas con las que se construyen las proteínas, y los que encontró Kaplan en el meteorito fueron glicina, alanina, valina, prolina, ácido aspártico y ácido glutámico). De hecho, los encontró incluso en mayores cantidades que las que se obtienen en experimentos de tipo Miller-Urey. Además, encontró dos de las cuatro bases nitrogenadas que conforman al ADN y al ARN (alanina y guanina).

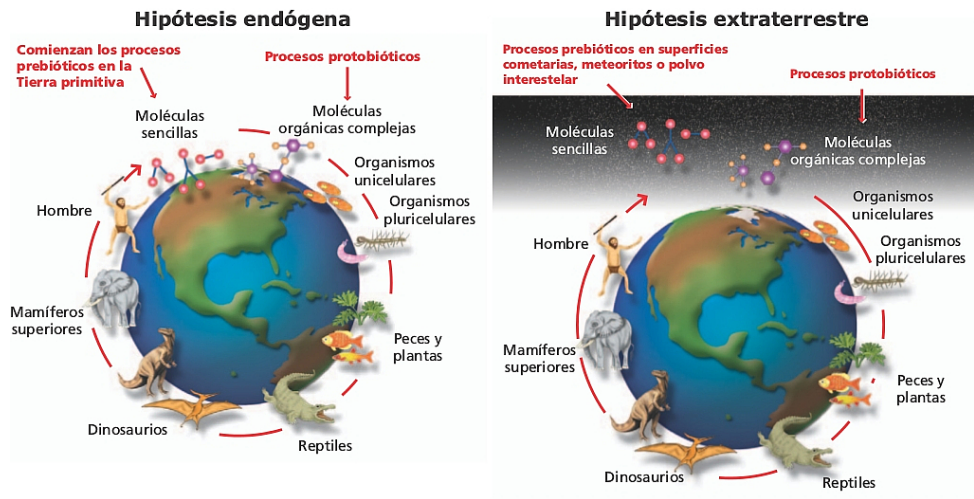


Figura 2: Dos escenarios alternativos para el origen de la vida en la Tierra.

Quedaba la posibilidad de que, sobre la superficie de la Tierra y guardado durante muchos años en un museo de París, el meteorito se hubiera contaminado con moléculas orgánicas provenientes de nuestro planeta. Sin embargo, K. A. Kvenvolden, otro geoquímico, realizó análisis fisicoquímicos de las moléculas orgánicas del meteorito, y demostró contundentemente que estas moléculas no provenían de la Tierra, sino que fueron sintetizadas en el espacio exterior. Lo que Kvenvolden hizo fue tomar dos muestras de aminoácidos, unos provenientes del meteorito y otros de la Tierra, y comparar sus propiedades físicas y químicas: ¡encontró que los aminoácidos del meteorito tenían propiedades físicas muy diferentes de las correspondientes propiedades de los aminoácidos terrestres! Si los aminoácidos del meteorito hubieran sido producto de una "contaminación terrestre", era de esperar que no se encontraran diferencias entre las dos muestras.

Después de esto, algunos astrónomos y astroquímicos se dedicaron particularmente a la búsqueda de materia orgánica en otras partes del espacio exterior, y encontraron que en las nubes de polvo interestelar y en los cometas también hay concentraciones de materia orgánica, en particular de aminoácidos y de bases nitrogenadas (con las que están hechos el ADN y ARN). Evidentemente, ningún astrónomo o astroquímico viajó a los confines del espacio exterior para tomar muestras de polvo interestelar o de cometas, regresando después a la Tierra para estudiarlas. Lo que hicieron fue analizar la luz proveniente de las estrellas lejanas y de los cometas, utilizando técnicas de análisis muy bien comprendidas y muy precisas, pertenecientes al área de la física denominada espectrometría. Encontraron en dicha luz (más precisamente, en los espectros de absorción y de emisión) la huella inequívoca de la presencia de materia orgánica, en particular, de aminoácidos y bases nitrogenadas.

El punto importante es que quedó demostrado, fuera de toda duda, que en el espacio exterior también existen las condiciones para la formación de moléculas orgánicas que en la Tierra encontramos íntimamente ligadas a la vida. Este hecho, por sí solo, no decía nada sobre el origen de la vida en la Tierra. Es decir, el que haya moléculas orgánicas en el espacio exterior no significa que la vida en la Tierra provenga del espacio exterior. En todo caso, lo único que demuestra es que los procesos prebióticos de síntesis de moléculas orgánicas se pueden dar en otras partes del Universo, tanto en nuestro confortable planeta como fuera de él. Sin embargo, la semilla de la duda estaba sembrada y, ahora sí, con bases muy firmes.

¿QUÉ FUE PRIMERO?

Conforme las investigaciones continuaron, se presentaron algunos problemas serios con la teoría de Oparin-Haldane y con los experimentos de tipo Miller-Urey, lo que condujo a algunos científicos a pensar que los procesos prebióticos y protobióticos no pudieron llevarse a cabo en la Tierra primitiva. Por un lado, tanto el modelo de Oparin-Haldane como los experimentos de tipo Miller-Urey suponían que el medio ambiente en el cual se llevaban a cabo las reacciones químicas de formación de moléculas orgánicas, era reductor, es decir, con mucho hidrógeno y poco (o casi nada) de oxígeno. Lo anterior obedece a que el oxígeno es un elemento muy reactivo químicamente, reacciona con casi todo lo que le pongan enfrente; en presencia de oxígeno libre las reacciones químicas que forman proteínas y ácidos nucleicos no se pueden llevar a cabo, porque el oxígeno “bloquea” dichas reacciones, impidiendo que se realicen. Así, la atmósfera primitiva de la Tierra debía ser reductora para permitir la formación de las moléculas orgánicas con las que estamos contruidos los seres vivos.

Sin embargo, algunos modelos teóricos recientes de la formación de la Tierra sugieren que, en lugar de reductora, la atmósfera primitiva era medianamente oxidante (con algo de oxígeno). Esto parece estar parcialmente confirmado por observaciones recientes realizadas en yacimientos volcánicos al norte de África que datan de hace más de 4000 millones de años, en los que se ha encontrado abun-

dante “oxígeno prehistórico” (es decir, con composición isotópica muy diferente a la observada actualmente), atrapado en los minerales que conforman dichos yacimientos. Aparentemente, la atmósfera primitiva no albergaba las condiciones reductoras para que se llevara a cabo la formación de moléculas orgánicas complejas y, por lo tanto, para que surgiera la vida.

Por otro lado, seguramente ya habrás observado una dificultad con la interrelación entre proteínas y ácidos nucleicos a la que nos hemos referido antes. Decíamos que sin proteínas no hay ácidos nucleicos, y viceversa, sin ácidos nucleicos no hay proteínas. Entonces, ¿qué fue primero, las proteínas o los ácidos nucleicos? Esta pregunta perturbó durante muchos años a los investigadores del origen de la vida. Al principio se creía que los dos tipos de moléculas evolucionaron juntos, unas dependiendo de las otras. Pero la interrelación entre ácidos nucleicos y proteínas es tan compleja, que parece poco probable (o acaso imposible) que tal evolución simultánea se haya dado. Resulta que en los últimos treinta años, un grupo de investigadores, entre los que destacan T. R. Cech, H. F. Noller y W. Gilbert, han encontrado una respuesta satisfactoria a esta interrogante, guiados por las propuestas de F. Crick, R. Orgel y C. R. Woese. Cech y Noller demostraron experimentalmente que el ARN es una molécula muy versátil, que puede reproducirse a sí misma, que puede autocatalizarse y catalizar otras reacciones químicas con otras moléculas, que puede construir proteínas o degradarlas; es decir, que la molécula sola de ARN puede realizar muchas reacciones metabólicas, ¡sin la ayuda de ninguna proteína!

Estos descubrimientos llevaron a Walter Gilbert a proponer “el mundo primitivo de ARN”, esto es, un mundo en el cual los principales procesos de síntesis y replicación de moléculas orgánicas estaban basados en la química del ARN. De acuerdo con Gilbert, a este mundo de ARN se le incorporaron después las proteínas, estableciéndose una interrelación cada vez más complicada entre éstas y los ácidos nucleicos. De este modo, el problema de qué fue primero quedaba resuelto: primero fueron los ácidos nucleicos (ARN y ADN) y después fueron las proteínas.

¿Y EL AGUA?

Si la hipótesis del mundo primitivo de ARN efectivamente es cierta (y cada vez hay más evidencia a favor de que sí lo es), entonces tenemos otro problema con el origen terrestre de la vida. Lo que ocurre es que el ARN es una molécula en extremo susceptible a la hidrólisis, lo que significa que se descompone en agua con mucha facilidad. De hecho, los investigadores que trabajan con ARN consideran al agua como su enemigo natural y tratan de mantenerla lo más lejos posible de sus experimentos. Por lo tanto, si las primeras moléculas orgánicas de importancia para la vida fueron de ARN, entonces no pudieron haberse formado en la Tierra primitiva, ya que ésta, en sus orígenes, era un planeta rebosante hasta el tope de agua. La idea de Oparin y Haldane, de una Tierra primitiva con sus mares llenos de materia orgánica (la “sopa orgánica” de Oparin), parece entonces ser falsa.

¿Y EL TIEMPO?

Existen otros problemas como los anteriores, que surgen cuando suponemos que la vida en la Tierra se originó en la Tierra misma. Las investigaciones recientes sobre el origen de la vida que tienen que ver con los procesos prebióticos y protobióticos, hacen ver que en la Tierra primitiva no existían las condiciones para que dichos procesos se llevaran a cabo. No tenemos espacio aquí para discutir a fondo todos y cada uno de los problemas con los que se han enfrentado los investigadores. Basta con mencionar, como un último ejemplo, el denominado “problema del tiempo”.

Hasta hace no mucho se creía que los primeros organismos vivos (organismos unicelulares como bacterias), aparecieron sobre la Tierra hace apenas 600 millones de años. Esta creencia estaba basada en la edad de los fósiles de bacteria más antiguos que se habían encontrado. Pero en 1992, los paleontólogos encontraron, en Sudáfrica y en el oeste de Australia, en los estromatolitos más antiguos del planeta, fósiles de cianobacterias (organismos unicelulares llamados algas verdes y azules) de aproximadamente 3600 millones de años de antigüedad. Más aún, en Isua, Groenlandia, en rocas volcánicas se encontraron vestigios de actividad biológica, que datan de hace 3900 millones de años!

Por otro lado, sabemos que la edad de la Tierra es de aproximadamente 4500 millones de años. Sin embargo, en sus inicios estaba muy caliente y era un lugar totalmente inhóspito para la vida. De hecho, hay evidencia de que la superficie de la Tierra fue bombardeada por meteoritos y asteroides durante los primeros 500 millones de años de su existencia. Estos impactos contribuían a mantener la temperatura de la superficie de nuestro planeta lo suficientemente alta como para abortar cualquier intento de formación de moléculas orgánicas (a temperaturas arriba de los 200 °C casi todas las moléculas orgánicas se deshacen). Para que los procesos prebióticos y protobióticos pudieran llevarse a cabo, la superficie de la Tierra debió enfriarse lo suficiente como para no romper, por medio del calor, las moléculas orgánicas que se hubiesen formado. No se sabe exactamente cuándo se llegó a una temperatura aceptable, pero sí sabemos que durante sus primeros 500 millones de años la Tierra no contenía ninguna molécula orgánica complicada. Por lo tanto, en nuestro planeta las condiciones para la vida no aparecieron sino hasta hace 4000 millones de años, cuando mucho.

Los datos anteriores nos hacen ver que la vida en la Tierra apenas si tuvo tiempo de crearse, ya que entre que el planeta se enfrió y aparecieron las primeras bacterias, pasaron a lo más 100 millones de años. Esto quiere decir que si los procesos prebióticos y protobióticos se hubiesen llevado a cabo en nuestro planeta, entonces en tan sólo 100 millones de años se pasó de una “sopa” de compuestos inertes simples, como metano, amoníaco e hidrógeno, a una “sopa” de bacterias autorreplicantes, con ácidos nucleicos, proteínas, azúcares, membranas, y todo lo demás, y con un metabolismo extraordinariamente complejo que incluso en la actualidad no entendemos del todo. Creemos que 100 millones de años es muy poco tiempo para que se formaran organismos vivos, aunque fueran unicelulares, a partir de compuestos químicos simples (tan sólo los dinosaurios dominaron la Tierra

durante 180 millones de años, más o menos). Nadie duda que se haya dado esta evolución que condujo a la vida; lo que se duda es que haya ocurrido en tan poco tiempo.

¿CASUALIDAD, ACCIDENTE U ORIGEN EXTRATERRESTRE?

Las consideraciones precedentes hacen ver al origen de la vida en la Tierra más como una casualidad que como una consecuencia de la interacción y organización de la materia orgánica, ya que para que los procesos prebióticos y protobióticos se llevaran a cabo en la Tierra primitiva, se requeriría de condiciones físicas y químicas muy improbables: una (auto)organización muy rápida de la materia orgánica; un ambiente químico reductor; temperaturas muy bajas; ausencia de agua, etc. Algunos autores han sugerido que tales condiciones pudieron haberse dado por "accidente" hace 4000 millones de años en algún nicho escondido de la Tierra, tal como una burbuja atmosférica atrapada en algún yacimiento mineral submarino, o cosas por el estilo. Sin embargo, otros científicos consideran que la vida es mucho más que un mero "accidente".

Pero entonces, ¿cuál es la alternativa? Si los procesos prebióticos y protobióticos no se pudieron dar en nuestro joven planeta, ¿qué otro lugar queda? La respuesta salta a la vista inmediatamente: el espacio exterior. Ya hemos visto que hay evidencia contundente de que en el espacio exterior (cometas, meteoritos, polvo interestelar) se forman algunas de las moléculas orgánicas indispensables para los seres vivos. Pero, además, el llevar el origen de la vida fuera de la Tierra, hacia el espacio exterior, resuelve también algunos de los problemas que se presentan cuando suponemos que la vida se originó aquí mismo:

- En el espacio exterior el oxígeno libre existe en cantidades muy pequeñas, mientras que el hidrógeno es el elemento más abundante. Por lo tanto, las condiciones reductoras requeridas para la formación de proteínas y ácidos nucleicos sí se dan "allá afuera".
- En el espacio exterior no abunda el agua, y la poca que hay está congelada, por lo que el mundo del ARN que propuso W. Gilbert sí puede existir fuera de la Tierra.
- En el espacio exterior la temperatura es muy baja (entre -260 y -270 °C), por lo que las moléculas orgánicas pueden formarse sin ningún problema.
- Los materiales arcillosos con los que están hechos los cometas sirven como catalizadores (aceleran reacciones químicas) para la formación de proteínas y ácidos nucleicos.
- En el espacio exterior se tiene muchísimo tiempo para que se lleven a cabo los procesos prebióticos y protobióticos, y no sólo los 100 millones de años (o tal vez menos) disponibles en la Tierra. En el espacio exterior disponemos de 10 mil millones de años para la realización de estos procesos, que era la edad del Universo cuando la Tierra se formó.

Vemos entonces que la hipótesis del origen extraterrestre de la vida no sólo cuenta con evidencia experimental, sino que además resuelve algunos de los problemas con los que se habían estado enfrentando los científicos sin tener éxito. Queremos insistir en que no estamos hablando de marcianos o de seres de otros mundos. Ni siquiera queremos dar a entender que del espacio exterior hayan caído bacterias o virus a nuestro planeta. Simplemente sabemos que, con alta probabilidad, los procesos prebióticos y protobióticos también ocurren en el espacio exterior, mientras que en la Tierra primitiva la ocurrencia de dichos procesos presenta serias dificultades.

Por otra parte, se tienen indicios de que quizá la vida existe o existió en el espacio exterior. En 1996, D. S. McKay y su grupo de la NASA estudiaron un meteorito que cayó de Marte en la Antártida hace 13 mil años y encontraron estructuras carbonatadas de forma globular que podrían ser fósiles de bacteria, de más de 3600 millones de años de antigüedad. Estas estructuras son similares a las que se encontraron en los estromatolitos de Australia.

Si los glóbulos carbonatados del meteorito efectivamente resultaran ser fósiles de bacteria, es claro que tales bacterias no provendrían de la Tierra. Por lo tanto, no sólo habría evidencia de que los procesos prebióticos y protobióticos se dan en el espacio exterior, sino también de que la vida misma puede surgir fuera de nuestro planeta. Hay que señalar, sin embargo, que existen serias dudas sobre la naturaleza de las estructuras globulares y para despejarlas posiblemente tengamos que esperar hasta el 2008; para entonces, una sonda robot, que la NASA contempla lanzar en el 2005, traerá a la Tierra muestras de la superficie de Marte.

NO TODO ESTÁ RESUELTO

Aun cuando el escenario extraterrestre del origen de la vida presenta ciertas ventajas respecto del escenario terrestre, no es definitivo. Quedan todavía bastantes problemas que resolver y existe mucha controversia en la comunidad científica al respecto. Por ejemplo, no se sabe de qué manera la materia orgánica en los meteoritos, cometas o polvo interestelar, bajó a la Tierra sin destruirse, y cómo fue que los procesos prebióticos y protobióticos que albergaban los meteoritos, cometas o asteroides proliferaron por toda la superficie de la Tierra dando lugar a la vida que ahora conocemos. Otro problema radica en que en el espacio exterior no se han encontrado todos los tipos de moléculas que utilizan los seres vivos en la Tierra, así que se tendrá que investigar cómo, a partir de las moléculas extraterrestres que se conocen, se originaron o se incorporaron todas las demás que nosotros utilizamos. El origen de la vida no está resuelto, ni con el escenario terrestre ni con el extraterrestre, y hace falta mucho trabajo todavía para llegar a la respuesta definitiva. Como te puedes dar cuenta, esto no es algo que pueda solucionar una sola persona, o un solo grupo de personas. En este tema han participado químicos, físicos, biólogos, astrónomos y geoquímicos, entre otros científicos de todo el mundo. Probablemente, a lo más que lleguemos sea a proponer modelos plausibles de cómo se originó la vida que después proliferó por toda la Tierra, sin que seamos capaces

de saber, a ciencia cierta, qué fue lo que pasó realmente hace 4000 millones de años en nuestro joven y primitivo planeta. Sin embargo, de las investigaciones actuales una cosa nos ha quedado clara, y es que la hipótesis endógena no es la única alternativa posible, sino que, con alta probabilidad, la vida también se puede originar en otros lugares.

⊙ *Esta es una página en blanco.* ⊙

LA REVOLUCIÓN CULTURAL Y LA ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN LAS CIENCIAS NATURALES *

LAS CIENCIAS NATURALES Y EL MODO DE PRODUCCIÓN CAPITALISTA

Las investigaciones en las ciencias naturales y la interrelación de estas con el cambio industrial han sufrido drásticos cambios en los últimos tres cuartos de siglo dando lugar a la llamada revolución científico-técnica (RCT). Como señala Breverman:¹

La ciencia es la última –y después del trabajo la más importante– propiedad social convertida en un agregado del capital. La historia de su conversión de un dominio de aficionados, “filósofos”, pensadores y buscadores de conocimiento a su estado presente altamente organizado y ampliamente financiado, es en gran medida la historia de su incorporación a la empresa capitalista y organizaciones subsidiarias. Al principio la ciencia no le costó nada al capitalista dado que simplemente explota el conocimiento acumulado por las ciencias físicas, pero más tarde, el capitalista organiza y dota sistemáticamente a la ciencia, pagando educación científica, investigación, laboratorios, etc., con el producto social excedente, sea que le pertenezca directamente a él o lo controle la clase capitalista en su conjunto bajo la forma de ingresos por impuestos. Un esfuerzo social, que antes era dejado relativamente al libre albedrío, se ve integrado a la producción y al mercado.

A diferencia de la revolución industrial inglesa en la que sólo se utilizaron algunos de los descubrimientos de las ciencias naturales y en la que en general la ciencia le debe a la tecnología y no al revés (por ejemplo la tecnología del vapor dió origen a la termodinámica), con la revolución científico-técnica toda la ciencia natural se integra a la producción industrial y el conocimiento científico es a la vez fuerza productiva y mercancía. La revolución científico-técnica no puede, pues, ser entendida en términos de innovaciones específicas, sino que debe ser entendida en su totalidad como un modelo de producción dentro del cual la ciencia ha sido integrada como parte de su funcionamiento ordinario.

* Publicado en: *Cuadernos de teoría y política*, julio 1983. México: Juan Pablos Editor /Universidad Autónoma de Guerrero.

¹ Harry Braverman, *Trabajo y capital monopolista*, Cap. VII. Ed. Nuestro Tiempo, 1975, p. 186.

Como comenta Braverman:²

La historia de la incorporación de la ciencia a la empresa capitalista empieza propiamente en Alemania. La temprana simbiosis entre ciencia e industria que fue desarrollada por la clase capitalista de dicho país probó ser uno de los hechos más importantes de la historia mundial en el siglo XX, proporcionó la capacidad para las dos guerras mundiales y ofreció a las otras naciones capitalistas un ejemplo que aprendieron a emular tan sólo cuando fueron obligadas a ello muchas décadas después. El papel de la ciencia en la industria alemana fue el producto de la debilidad del capitalismo alemán en sus etapas iniciales junto con el avanzado estado de la ciencia teórica en Alemania. [...] Hacia 1870, el sistema universitario alemán podía jactarse de tener un considerable número de profesores y conferencistas, especialmente en las ciencias, que favorecidas por trabajos ligeros y laboratorios bien equipados, podían perseguir investigaciones básicas. Los laboratorios de investigación industrial, como el mantenido por Krupp en Essen, se iban a convertir en modelos para las investigaciones de las compañías en todas partes. Los institutos politécnicos que surgieron durante la década de 1830 y 1840, como una alternativa a la educación universitaria y fueron evolucionando hacia las famosas *Technische Hochschulen* atraían estudiantes de todas partes del mundo. Además el sistema de aprendizaje, más fuerte que en ninguna otra parte, estaba produciendo mecánicos más altamente calificados y en mayores cantidades en los oficios requeridos por las nuevas industrias.

La manera en que Alemania anticipó la era moderna es ilustrada mejor que en ninguna otra parte, en la historia de la industria química alemana: "Fue Alemania la que mostró al resto del mundo cómo hacer estratégicas materias primas partiendo de arenas y un montón de carbón. Y fue IG Farben quien abrió el paso a Alemania. IG cambió a la química de una investigación pura y comercialización de píldoras, en una industria mamuth que afecta cualquier fase de la civilización".

[...] en un tiempo en que las industrias inglesas y norteamericanas usaban sólo en forma esporádica a científicos con entrenamiento universitario, como ayuda en problemas específicos, la clase capitalista alemana había creado ya ese esfuerzo total e integrado, que organizó en las universidades, laboratorios industriales, sociedades profesionales, asociaciones comerciales, y en investigaciones patrocinadas por el gobierno, un continuo esfuerzo científico tecnológico que fue la nueva base de la industria moderna.

En el caso de los Estados Unidos, donde durante la Primera Guerra Mundial se organiza el National Research Council encabezado por Millikan con grandes grupos de investigaciones de tipo militar,³ este se disuelve al finalizar la guerra y es de hecho hasta la Segunda Guerra Mundial cuando los Estados Unidos obtienen una base científica igual a su fuerza industrial y que la investigación científica fuertemente financiada por las instituciones y el gobierno, proporciona sistemáticamente el conocimiento utilizado en la industria.

² Harry Braverman, *ibid.*, p. 189-191, 193.

³ M. de Maria y R. W. Seidel, "Lo scienzato e l'inventore. Inizio dell'integrazione sistematica fra scienza e industria in U.S.A. durante la prima guerra mondiale", *Testi e Contesti*, no. 4, p. 5, 1980.

Hasta hace 15 o 20 años el planteamiento dominante de los científicos de izquierda consideraba el “pleno desarrollo de la revolución científica-técnica” como incompatible con el capitalismo y que sólo podía darse en el socialismo. También dominaban los planteamientos economicistas lineales que suponían que el desarrollo de la ciencia y la técnica implicaba el desarrollo de las fuerzas productivas, lo que conduciría inevitablemente a una sociedad más justa, a una sociedad socialista o comunista. Por otro lado, se suponía que las reuniones internacionales de científicos eran modelos de convivencia en una sociedad futura. Todo lo anterior implicaba que el científico natural progresista debería limitarse dentro de su profesión a hacer “buena ciencia”, de preferencia en campos de frontera y a colaborar en las reuniones internacionales con otros científicos independientemente de su posición política.

Uno de los elementos que contribuyeron a romper estos planteamientos fue la guerra de Vietnam, ya que muchos de los científicos que en las reuniones internacionales eran “modelo de comportamiento” eran responsables del diseño de armas para asesinar vietnamitas. Tal esquizofrenia era difícil de aceptar. Por otro lado, con los movimientos sociales de 1968 los científicos cobran conciencia cada vez más clara del carácter superespecializado, jerarquizado y alienado de su trabajo, muy lejos de la concepción amplia del mundo que se suponía era ingrediente básico del trabajo científico. Si contemplamos un país de capitalismo avanzado como Estados Unidos, en general, el científico está superespecializado, comprende sólo su problema local y son relativamente pocos, en general en niveles jerárquicos superiores, los que tienen una concepción global de lo que hay que hacer. Se ve obligado a seguir las modas y se mide su “productividad” por el número de publicaciones, considerándose lo publicado como bueno, ya que si no, no se publicaría. En la sociedad capitalista avanzada la organización del trabajo científico presenta los rasgos de jerarquización, superespecialización y alienación que caracterizan al trabajo industrial y otros aspectos de la vida diaria en dicha sociedad.⁴

En el caso de un país como México tenemos además que la inversión en investigación y desarrollo es relativamente pequeña,⁵ (0.6% del Producto Interno Bruto) respecto a la de los países capitalistas desarrollados (1% – 4%), le falta coordinación sobre base sectorial y nacional, con pequeños grupos independientes no coordinados, laboratorios subfinanciados y subequipados y con poca relación con la realidad económica. La orientación de la investigación está dictada, en general, por las corrientes dominantes en los países de capitalismo avanzado y es, pues, un apéndice de la ciencia de estos países.

Por otro lado, aunque en el momento actual es innegable el desarrollo explosivo de las ciencias en las formaciones sociales capitalistas, la brecha entre los países capitalistas dominantes y los dominados se ensancha cada vez más (jugando con frecuencia la ciencia y la técnica un papel importante) y lo mismo puede decirse de las diferencias entre clases y estratos en unos y otros países.

⁴ G. Ciccotti y G. Jona Lasinio, “La produzione di scienza nella società capitalista avanzata”. En *L’Ape e l’architetto*. Ed. Feltrinelli, 1976.

⁵ Programa Nacional de Ciencia y Tecnología 1978-1982. CONACYT, 1978.

Giovanni Rossi nos decía en 1973,⁶ al analizar la desigualdad social que:

La diferencia entre el nivel de vida, en 1770, entre países desarrollados y países subdesarrollados, apenas era del 20 %. En 1860 del orden de 1 a 5, en 1900 de 1 a 6: entre la primera revolución industrial alemana la desigualdad se ha multiplicado por seis. En 1929, la “gran crisis” (también época de la concentración monopolista acelerada), se pasa a una relación de 1 a 7. En 1953 de 1 a 9.5, en 1965 de 1 a 12... en nuestros días de 1 a 16.

El Banco Mundial dice en 1971: “la diferencia entre ingresos por habitante de los países ricos y los países pobres crece constantemente tanto desde el punto de vista relativo como absoluto...” La brecha entre ricos y pobres se abre constantemente.

En un país periférico del capitalismo como México, en 1976, 600 familias poseen fortunas entre 30 y 40 millones de pesos, 300 familias poseen fortunas de centenares de millones de pesos, 100 familias poseen fortunas del orden de miles de millones de pesos. Mientras un 33 % de la población urbana vive en condiciones infrahumanas en ciudades perdidas.

Corresponde esta situación social, datos de 1970, a un control capitalista monopolístico del tipo siguiente: 141 empresas monopolísticas controlan el 60 % de todas las ramas industriales del país, con un 80 % de capital norteamericano. En la medida en que esta concentración monopolística y esta dependencia externa crece, los abismos sociales crecen.

En cuanto a los países “ricos” del capitalismo, el mismo ejemplo de Estados Unidos es ilustrativo. H. Braverman, en *Trabajo y capital monopolista*, p. 461, nos dice:

De acuerdo con los datos de Marx, la lista oficial de indigentes en Inglaterra y Wales en 1865 fue de 971 433 y entonces se contaba con una población de alrededor de 20 millones según el censo de 1861, por tanto, el pauperismo oficial lo constituía el 4.6 % de la población. En los EUA la cosa más cercana a una lista oficial de indigentes es el registro de los que requieren asistencia social. En 1973, este registro contenía 14.8 millones de personas sacadas de una población total de 210.4 millones o el 7 % de la población...

Aumento pues de miseria, en el tiempo, respecto a su homólogo inglés.

En 1970, la Oficina de Estadísticas Laborales de EE.UU. señala, en Nueva York, un subempleo de 39.9 % de la población neoyorquina total, correspondiendo al 66.6 % de la fuerza de trabajo disponible.

El *New York Times Magazine* señalaba: “en 1970, en toda la nación, el desempleo sumó hasta el 4.9 % de la fuerza de trabajo, desde entonces ha estado rondando cerca del 6 % mes tras mes. De acuerdo con la encuesta ECE (Censo de Empleo, EE.UU.) en las áreas centrales de las ciudades el promedio de desempleo en 1970 fue de 9.6 %...”

En cuanto a las minorías sociales marginadas, los franceses Ertel, Fabre, y Marienstras, decían en 1971: “el ingreso medio familiar, en 1970, de una familia negra

⁶ G. Rossi, “La science des pauvres”, *La Recherche*, enero de 1973.

es de un 60 % al del correspondiente de una familia blanca. En tanto que el 8 % de las familias blancas tienen un ingreso insuficiente para vivir, en el caso negro es de 29 %". Esto es, abismos sociales crecientes que también pasan por la discriminación racial.

Así pues, el desarrollo del capitalismo conlleva el aumento de la desigualdad entre países y al interior de *todo* país capitalista. A esto hay que añadir los trastornos ecológicos y la expropiación de recursos a nivel planetario, el riesgo de una catástrofe nuclear y la utilización de las ciencias naturales y sociales para un control cada vez mayor de todos los aspectos de la vida del hombre (consumismo, medios de comunicación y control de masas, etc.); tenemos pues que el desarrollo de las ciencias y las técnicas (así sin mayor calificación) no conduce automáticamente a una sociedad más justa.

LA REVOLUCIÓN CULTURAL Y LAS CIENCIAS NATURALES

Los comentarios anteriores sugieren que el tránsito a una sociedad igualitaria, en la que se minimicen las diferencias de nivel de vida y de poder de decisión y que al mismo tiempo se eleve sistemáticamente el nivel y "calidad" de la vida, lo que llamamos ciencias naturales deberán sufrir cambios radicales en su contenido, metodología y organización. Vale la pena señalar el largo entrenamiento del científico natural en la formación social capitalista que hace que con frecuencia abrumadora el científico comience a hacer investigación "seria" en su tesis doctoral cuando tiene ya treinta años. En una sociedad igualitaria, teniendo todos la misma alimentación y habitación, no deberían unos dedicarse durante largos años a probar teoremas o realizar experimentos y otros a cargar sacos de cemento; el largo entrenamiento actual del científico no contribuye a eliminar tales diferencias.

Como mencionábamos anteriormente, una de las características de la organización del trabajo (tanto industrial como científico) en la formación social capitalista es la atomización de éste en procesos elementales que deben ser altamente confiables (fiabilidad local) y que se montan en un diseño "óptimo" que se supone único o casi único. Esta fiabilidad local sería garantía de la fiabilidad global. Lo anterior es válido tanto para el obrero en la cadena de montaje de una fábrica de automóviles como para el científico superespecializado en un gran instituto o laboratorio. En una sociedad en la que se enfatizen las iniciativas y el control popular y se minimicen las diferencias entre concepción y ejecución, se debería tratar de mantener la fiabilidad global (aunque correspondiendo a objetivos sociales comunitarios diferentes al de la ganancia capitalista) sin tener que pagar el precio social que parece estar correlacionado con la confiabilidad local. Discutiremos posteriormente esto en algún detalle, por el momento sólo queremos señalar su relación con planteamientos como los de Drago:⁷

Cuando se une el criterio científico de eficiencia al de desarrollo, aparecería este último como único, repitiendo inevitablemente el desarrollo de los países avanzados. Parecería que cualquier economía eficiente es al menos potencialmente

⁷ A. Drago, "Evidence for an alternative in natural sciences". Univ. de Napoles, 1980.

capitalista... Del mismo modo parece inevitable el tener que utilizar una gran cantidad de energía inanimada y también lo parece la división del trabajo, la especialización y la rotura de la experiencia de la vida del individuo; todas las instituciones que ya han aparecido en la civilización occidental parecen inevitables así como su separación funcional.

Señalemos también los planteamientos de Bukharin en su *Tratado de materialismo histórico*⁸ de 1921. Dice que “las fuerzas productivas, esto es, la base técnica de la sociedad, determinan la evolución social porque ellas expresan la correlación entre la sociedad, conjunto real de términos y su medio... Ahora, la correlación entre el medio y el sistema es una magnitud que determina en último análisis el movimiento de no importa qué sistema”. Al ser las ciencias naturales el aspecto más importante de la relación con la naturaleza en la formación social capitalista, los comentarios anteriores sugieren que en una sociedad igualitaria se necesitarían cambios radicales en tal relación y por lo tanto en lo que llamamos ciencias naturales.

No es de extrañarse que el movimiento marxista se haya planteado una y otra vez la búsqueda de una ciencia alternativa coherente, primero, con las necesidades del proletariado, y luego, con las de una sociedad sin clases. En ese sentido puede citarse la ciencia proletaria de Bogdanov a principios de este siglo (enfaticando la organización del trabajo como el fundamento de la nueva ciencia proletaria) y a Bukharin en 1921. A este respecto vale la pena citar un párrafo de su libro sobre materialismo histórico:

Este libro nació de las discusiones que tuvieron lugar en las conferencias sobre trabajos prácticos que el autor dirigía con J. P. Denike; los camaradas que participaron en ellas acaban de terminar sus estudios en la Universidad Sverdlov. Así se formó un nuevo tipo de hombre que estudia filosofía y es guardia con el fusil en la mano, que discute los problemas más abstractos y que corta madera, que trabaja al mismo tiempo en la biblioteca y en la fábrica. Estos camaradas pueden ser considerados los verdaderos autores de la presente obra.⁹

Se pueden citar también los trabajos presentados en el congreso de Londres de 1931 por la delegación bolchevique encabezada por Bukharin¹⁰ y sobre todo la revolución cultural china de los sesenta. Tenemos, pues, como comenta Drago, que “el movimiento marxista siguió el programa de una ciencia alternativa durante periodos largos de tiempo y con el soporte de líderes notables”.¹¹

En años recientes, dentro de la formación social capitalista podemos considerar como ciencia alternativa, como aspectos de una revolución cultural, los proyectos de reorganización de todos los aspectos de la producción planteados por colectivos de obreros, técnicos y científicos en fábricas de Inglaterra e Italia.

La fábrica Lucas Aerospace,¹² de Inglaterra, es una empresa mixta (80 % de las acciones pertenecen al Estado y el 20 % restante al sector privado) que se dedi-

⁸ N. Bukharin, *Tratado de materialismo histórico*, p. 370, Centro do livro brasileiro.

⁹ N. Bukharin, *ibid.*, p. 8.

¹⁰ N. Bukharin, *Science at the crossroads*. London, Cass, 1971.

¹¹ A. Drago, *ibid.*

¹² M. A. Martínez Negrete, *Ciencia, política e ideología*. Facultad de Ciencias, UNAM, 1982.

ca especialmente a la automoción y a la aviación. Desde 1972 y bajo los efectos combinados del desplazamiento de actividades hacia terceros países y de la crisis económica británica e internacional se inicia un intenso proceso de reestructuración y "racionalización"; como consecuencia, la fábrica, que contaba con 18 mil empleados en 1970, se vería reducida a cerca de 9 mil para 1980.

Estas acciones represivas contra el empleo por parte de la empresa motivaron la originalidad del movimiento: se formaron inmediatamente comités combinados, reuniendo capacidades, habilidades, destrezas y conocimientos científicos y tecnológicos, para diseñar un número muy grande de productos realmente útiles a la sociedad (para los que siempre habría demanda), explotables comercialmente y que implicaran la salvación de los puestos de trabajo, junto con la difusión y aplicación de otras medidas no menos fundamentales como la humanización del proceso de producción de tales mercancías.

Se generó así el llamado Plan Cooperativo Alternativo. Después de un intenso periodo de recopilación de habilidades y de un largo tiempo de estudio se diseñaron 150 productos; en vez de artículos militares o de dudosa utilidad social, se fabricaron mercancías destinadas a satisfacer necesidades no cubiertas; equipo médico, por ejemplo, y/o a hacer posible una explotación más racional de los recursos naturales mediante la investigación y el desarrollo de fuentes energéticas descentralizadas y no lesivas al ambiente, para ser utilizadas bajo el control social. En la elaboración de este plan se borraron las diferencias entre jerarquías, siendo escuchada en igualdad de circunstancias la voz del obrero de piso y del doctorado en ciencias y según consta la experiencia, de la curiosa y desacostumbrada cooperación entre trabajadores manuales e intelectuales, surgió una nueva forma de hacer ciencia y técnica más integradas horizontalmente que como suelen estarlo en una empresa o institución verticalmente jerarquizada.

El Plan Cooperativo Alternativo de los trabajadores de Lucas fue presentado a la empresa en 1976 y fue rechazado por ésta, pero en la medida en que el 80 % de las acciones de la empresa son estatales, se vió conveniente que el plan se discutiera en el Parlamento. El proceso de discusión continúa aunque sin grandes esperanzas, sobre todo después de la subida de la señora Thatcher al poder.

Otra experiencia similar es la de la Montedison de Castelanza, Italia. En esta fábrica de productos químicos, los consejos de fábrica reunieron el llamado "Grupo Obrero Homogéneo" el que juntando los conocimientos parciales de cada obrero o técnico reconstruyó todo el proceso productivo y se diseñaron procesos alternativos menos contaminantes al interior y exterior de la fábrica, en que se desperdiciaran menos recursos y en que el control obrero fuese mayor. Se pudieron imponer muchas de las peticiones en las revisiones del contrato colectivo de trabajo y los consejos de fábrica han detectado la presencia de substancias cancerígenas y publicado una serie impresionante de trabajos.¹³

Aunque por estar inmersas estas experiencias dentro de formaciones sociales capitalistas, han sufrido con el reflujo político de estos últimos años, constituyen

¹³ "La lotte dei lavoratori per la costruzione della scienza del lavoro", Simposio Internacional de Ciencia y Sociedad. Facultad de Ciencias, UNAM, noviembre, 1979.

proyectos piloto que sirven para acumular experiencia sobre lo que debe ser un saber alternativo por y para las grandes mayorías.

En el mismo sentido se pueden citar los movimientos colectivos ecológicos y antinucleares, y algunos planteamientos de las llamadas tecnologías alternativas.

El capitalismo, en virtud de su necesidad de un “desarrollo” siempre creciente y de la producción por la producción misma, buscando la eficiencia productiva y tomando en cuenta sólo un número reducido de factores, implica un desperdicio siempre creciente de recursos y la destrucción del medio ambiente “natural” y “social”. Sin olvidar que la sociedad humana por el hecho de estar en interacción con el resto de la naturaleza la modifica y es modificada por ésta; en una sociedad futura se buscará minimizar el “impacto destructivo” sobre la naturaleza, considerando hasta donde se pueda la situación en toda su complejidad y teniendo en mente la repercusión sobre las condiciones de vida de las generaciones futuras.

Frente a la centralización de las decisiones que caracteriza al capitalismo, se potenciará la descentralización y el control popular.

En el caso de los reactores nucleares, los programas han sido criticados duramente por movimientos colectivos organizados, no sólo por las implicaciones desastrosas de un accidente grave sino también porque no está resuelto el problema de los desechos radioactivos. Por otro lado, se tiene la posible aplicación militar y que esta tecnología, fuertemente centralizada y en gran escala, difícilmente se presta al conocimiento y control popular. La toma colectiva de conciencia de estos hechos y las acciones subsecuentes han implicado que se ha parado la construcción de reactores nucleares en diversos sitios y países. Aunque en esto han contribuido razones económicas, creemos que es un ejemplo del rechazo popular organizado de alternativas científicas y tecnologías no deseables.

Asociado a lo anterior tenemos lo referente a las llamadas tecnologías alternativas. Bajo este nombre se agrupa un conjunto heterogéneo de proposiciones que tendrían como denominador común el desviarse del estereotipo del desarrollo científico-técnico de los países capitalistas avanzados.

Algunas de ellas han sido presentadas por el capitalismo como posibles alternativas en vista de la imposibilidad de que los países de capitalismo dependiente sigan el camino de los avanzados y de los aspectos destructivos de la revolución científica técnica en estos últimos; otros han sido planteados por personas de matices políticos diversos asociados a los movimientos ecologistas y otros por la izquierda marxista:

- a) *Tecnologías intensivas en trabajo y de bajo costo.* En los países capitalistas subdesarrollados “o de desarrollo intermedio” abundaría la mano de obra y faltaría el capital y se necesitarían tecnologías consistentes con estos rasgos. Nótese que por un lado esto permitiría (quizás) al capitalismo disminuir las tensiones anticapitalistas y por otro lado serían coherentes con una sociedad diferente de la sociedad industrial, centralizada, capitalista; es utópico el pensar en medidas técnicas aisladas que sólo sean coherentes con una sociedad capitalista o socialista.

- b) *A pequeña escala.* Tendrían mayor capacidad de mano de obra que las grandes, podrían aprovechar recursos reales y otros factores de la producción que no existen en abundancia a escala local, presentarían mayor adaptabilidad y flexibilidad ante condiciones que cambian de modo rápido y facilitarían el control popular de las iniciativas y la puesta en práctica de éstas.
- c) *Tecnologías "blandas", "limpias", "ambientalmente sanas".* Tecnologías flexibles, durables y no contaminantes. En el caso energético, se apoyan en flujos renovables de energía como el sol, el viento, la vegetación; son diferentes entre sí y cada uno de los componentes es capaz de aportar un máximo de eficacia en circunstancias definidas. Son flexibles y con contenido técnico relativamente modesto (lo que es diferente a no sofisticado) y pueden ser entendidas y usadas sin capacidades particulares. Corresponden en escala y distribución a las necesidades de los consumidores finales. Estas tecnologías blandas son coherentes con el aspecto anteriormente mencionado y a diferencia de las tecnologías duras (de alto contenido tecnológico y en general centralizadas y a escala grande), permiten la descentralización y minimizan el impacto sobre la naturaleza y la ecología.
- d) *Tecnologías alternativas.* El término alternativas enfatizaría que no existe un camino científico-técnico único y que dada una formación social se tendrían tecnologías coherentes o no con ella. Las tecnologías dominantes en una formación social serán aquellas coherentes con los intereses de las clases o grupos dominantes y en el tránsito a una formación social diferente se necesitaría ciencia y tecnología alternativas.

Muchas de estas medidas serían coherentes con el tránsito a una sociedad comunista, facilitarían las iniciativas, comprensión y control popular de los procesos y permitirían disminuir las diferencias entre concepción y ejecución. Sin embargo, algunos de los aspectos serían consistentes con una organización alternativa del capitalismo en que se eviten algunos de los problemas asociados al desarrollo "destrutivo" de las fuerzas productivas (aunque no es nada claro que el capitalismo pueda poner en práctica estos "aspectos alternativos" dados los intereses creados y las contradicciones internas presentes).

Hay que tener en cuenta que no se puede encontrar una tecnología o abanico restringido de tecnologías que sean *sólo* coherentes con un tipo de formación social dada y no con otras (aunque el grado de coherencia varíe según la formación social de que se trate). Será la claridad respecto a las características fundamentales de una sociedad comunista lo que permitiría absorber, o rechazar, total o parcialmente, las diferentes tecnologías, así como desarrollar otras coherentes con el tránsito a dicha sociedad.

No habrá que olvidar la situación actual históricamente concreta y que las estructuras centralizadas y a gran escala (por ejemplo, la Ciudad de México) tienen una inercia y no van a desaparecer de la noche a la mañana. Esta "inercia" debe ser tomada en cuenta en la táctica a seguir, sin dejar de oponerse a los pasos que conduzcan a la creación de nuevas unidades centralizadas de este tipo. Es posible que

una sociedad comunista sea compatible con unidades de tamaño y “dureza” diversas, siempre y cuando se ponga énfasis en el control popular y se intercambien los roles con suficiente velocidad. Las jerarquías seguirían existiendo, pero en vez de ser cuasiestáticas como en la sociedad capitalista, serían *jerarquías dinámicas* en las que se estaría un tiempo relativamente corto en las diversas labores; sin embargo, no cualquier proceso productivo sería compatible con estas *jerarquías dinámicas* y muchos de ellos tendrían que ser eliminados o reestructurados a fondo.

Por otra parte, si se tiene en mente no un “camino óptimo único” sino un conjunto de caminos cuasiequivalentes se podrían encontrar soluciones compatibles con restricciones o condiciones adversas.

Un punto importante que hay que tener en cuenta es que en el tránsito a una sociedad sin clases juega un papel fundamental no sólo la ciencia y la técnica (y en general el desarrollo de las fuerzas productivas) sino la solidaridad humana entre grupos sociales coherentes, siendo una pregunta abierta cuál es el valor del umbral en el desarrollo de las fuerzas productivas que permita el cambio a una sociedad comunista. (Aunque el concepto de umbral en el desarrollo de las fuerzas productivas no es claro, ya que dicho desarrollo no es una variable unidimensional acumulativa).

En las luchas revolucionarias de los pueblos chino y vietnamita ha jugado un papel fundamental la solidaridad entre grupos sociales coherentes (en parte asociado a las estructuras comunitarias del modo de producción asiático) y a pesar de las contradicciones y dificultades actuales en esos países, son ejemplos claros de la importancia de la solidaridad humana y la conciencia de clase en la lucha por una sociedad comunista.

La discusión de los párrafos anteriores sugiere algunas líneas de investigación y enseñanza en los institutos y facultades de ciencias naturales. Un tópico general sería el estudio del flujo de energía, materiales e información (tanto en la sociedad humana como en el ecosistema del cual forma parte) coherente con los objetivos de las diferentes formaciones sociales. Se llevaría a cabo un análisis crítico de las características destructivas de ese flujo en la formación social capitalista y se trataría de aclarar las características que serían importantes en una sociedad comunista y, lo que es más importante, con los pasos concretos que puedan darse en el momento actual que sean coherentes con el tránsito a dicha sociedad futura. Dentro del margen de maniobra que se tenga, deberá lucharse por ir poniendo en práctica los resultados de dicho análisis y se tratará de difundir en la sociedad, del modo más amplio posible, los elementos de juicio que permiten llegar a tales conclusiones operativas.

Se trataría de poner en práctica “dominios abiertos, activos” en que se tratase de resolver algunos de los problemas que se presentan en el tránsito a una sociedad comunista y permitiese acumular experiencia que ayudaría a minimizar los errores en países en que, tras una rotura revolucionaria, se presenta un conjunto de problemas que es necesario resolver con rapidez. El adjetivo de “abierto” enfatiza el hecho de que no se trata de dominios aislados de la práctica asociada a la problemática política y económica de la sociedad en que están inmersos, sino que

implican una lucha constante, y con “activos” queremos señalar que sólo esta lucha constante logrará la persistencia de estos dominios, teniendo en cuenta que en más de una ocasión la presión represiva los hará desaparecer localmente aunque un esfuerzo organizado permitirá su aparición en otras zonas.

El desarrollo desigual y contradictorio de las “áreas productivas” y la presencia de formas de producción precapitalista sugiere la potencialidad de llevar a cabo una labor de organización alternativa en esas áreas, aunque hay que tener en cuenta que el nivel de represión potencial y real es mayor que en las universidades y otras instituciones de enseñanza.

ALGUNOS PLANTEAMIENTOS TEÓRICOS

Como comentábamos anteriormente, en una sociedad igualitaria deberían minimizarse las diferencias en nivel de vida y en poder de decisión y elevarse sistemáticamente el nivel y “calidad” de la vida. Mientras que en las comunidades campesinas (como las de América Latina o de Asia) las diferencias entre los hombres son relativamente pequeñas, son sociedades muy pobres y la vida es muy dura. Por otro lado, en la formación social capitalista el nivel de producción es elevado pero existen grandes diferencias sociales y todos los aspectos de la vida del individuo son objeto de control y beneficio capitalista. Aunque con cierta frecuencia se ha dicho que primero hay que producir, “desarrollarse” y luego se cerrarán las brechas, basta analizar las características de la formación social mexicana actual para ver la falacia de tal planteamiento.¹⁴ Si, como en el caso de China y Vietnam, partimos de las características igualitarias de las sociedades campesinas del modo de producción asiático y manteniendo este carácter igualitario se trata de aumentar la producción evitando jerarquías, los zig-zags de China, incluyendo el fracaso relativo de la revolución cultural, muestran las dificultades que se enfrentan.

En virtud de lo anterior pueden ser útiles consideraciones teóricas que ayuden a hacer más nítidas las dificultades que se enfrentan. En primer lugar, queremos señalar que en una revolución biológica o social, muchos de los elementos previos a la revolución desaparecen o permanecen jugando un papel diferente, mientras que muchos otros continúan sin modificación. Sin embargo, en el caso de una sociedad sin clases, de una sociedad radicalmente diferente no sólo de las sociedades capitalistas sino de las sociedades clasistas anteriores, esperamos que los cambios sean radicales y que sean relativamente pocos los elementos que permanezcan sin cambios o con cambios superficiales. Esto hace pensar que cualquier método de análisis que partiendo de la situación actual trate de llegar a una sociedad comunista mediante una acumulación de reformas (por decirlo en términos matemáticos, que tomando la situación actual como dinámica no perturbada trate de llegar

¹⁴ Mientras que en nuestro país un número reducido de familias controla la mayoría de la riqueza, en el Distrito Federal, en 1976, cuatro millones de personas habitaban en “ciudades perdidas” y tres millones no tenían trabajo. En 1973, en Monterrey, el 70 % de la población carecía o de agua potable o de drenaje o de gas y de luz y el 40 % ganaba para sostener una familia menos de 800 pesos al mes. En 1970, dos millones y medio de niños entre 6 y 14 años quedaron sin escuela y en las escuelas rurales indígenas la población escolar deserta en un 60 % en el primer año de primaria.

a la sociedad futura por métodos perturbativos) está probablemente condenado a fallar ya que estaríamos separados de una sociedad sin clases por un “cambio de fase radical” que no podría ser alcanzado por métodos perturbativos. En estas circunstancias quisiéramos tomar como punto de partida de un análisis teórico una situación radicalmente distinta de la de las formaciones sociales capitalistas actuales y con tal objeto podemos tratar de definir los rasgos generales de una sociedad en la que *se tengan los contrarios de los aspectos más característicos e importantes de la formación social capitalista*. Aunque no es nada obvio cómo elegir tales rasgos más característicos del capitalismo y cómo definir su contrario, esperamos que pueda servir de punto de partida de un camino “más o menos perturbativo” que conduzca a una formación social igualitaria viable. A lo largo de este camino deberían tomarse como elementos importantes la experiencia de los llamados países socialistas, con particular énfasis en aquellos casos de revolución cultural ya sea en países socialistas o dentro de los países capitalistas. Aparte de tomar como punto de partida los contrarios de los aspectos más característicos e importantes de la formación social capitalista, creemos que deberían tomarse en cuenta algunos de los puntos mencionados en el apartado anterior. Uno de ellos es lo referente a las *jerarquías dinámicas* en que se intercambiarían los roles con suficiente velocidad y en que se estaría un tiempo relativamente corto en las diversas labores. Otro es la complejidad interdisciplinaria de los problemas y la importancia del estudio de los flujos de energía, materiales e información, tanto en las sociedades humanas como en los ecosistemas asociados a ellas. En muchos de estos problemas nos encontraríamos frente a sistemas complejos abiertos en que intervendrían diversas disciplinas y un número muy grande de factores siendo muchas veces de difícil repetibilidad. Frente a problemas de este tipo tanto el método científico galileano como el racionalismo lógico podrían mostrar limitaciones importantes.

Un programa de este tipo trasciende las metas mucho más limitadas del presente trabajo sobre las ciencias naturales y en esta sección nos restringiremos a señalar algunos puntos que podrían ser pertinentes a dicho programa.

En primer lugar, como mencionábamos anteriormente, una de las características de la organización del trabajo (tanto industrial como científico) en la formación social capitalista es la atomización de éste en procesos elementales que deben ser altamente confiables (fiabilidad local) y que se montan en un diseño “óptimo” que se supone único o casi único. Esta fiabilidad local sería garantía de la fiabilidad global. Lo anterior es válido tanto para el obrero en la cadena de montaje como para el científico superespecializado en un gran instituto o laboratorio. En este último caso, los largos años de entrenamiento serían garantía de una fiabilidad local alta; diciéndolo de un modo burdo, para que su respuesta teórica o experimental sea válida hasta un número grande de decimales.

En una sociedad en la que se enfatizen las iniciativas y el control popular y en la que se minimicen las diferencias entre concepción y ejecución se debería tratar de mantener la fiabilidad global (aunque correspondiendo a objetivos sociales comunitarios diferentes al de la ganancia capitalista) sin tener que pagar el precio social que parece estar correlacionado con la fiabilidad local. A diferencia de las concep-

ciones “atomistas” en las que domina la idea de un solo camino óptimo a nivel local, se sugiere que nos encontraríamos localmente frente a un gran conjunto de caminos cuasiequivalentes consistentes con una fiabilidad global. Por otro lado, la presencia de estas redes de caminos cuasiequivalentes implicarían una flexibilidad y capacidad de adaptación grandes y permitirían un aprendizaje rápido y eficaz.

Cabe señalar que si bien la organización “taylorista” del trabajo científico e industrial puede asociarse a una concepción reduccionista mecanicista, en que un error muy pequeño en la dinámica de un “nivel inferior” es garantía de un error muy pequeño en un “nivel colectivo superior”, la dinámica de otros aspectos de la materia sugiere organizaciones diferentes. Podemos citar el caso de las máquinas térmicas en que aunque en el nivel molecular tenemos una “agitación térmica caótica” la energía se transmite preferentemente a uno de los modos macroscópicos coherentes, por ejemplo el cigüeñal, en el caso de un automóvil. Otro ejemplo son algunos tipos de láser en que se tiene como entrada radiación electromagnética desordenada y como salida pulsos coherentes. Tenemos pues que una dinámica caótica y desordenada en el nivel microscópico es consistente con una dinámica “ordenada” y “determinista” en el nivel macroscópico.

Otro ejemplo es el del sistema nervioso central en el que aunque las neuronas disparen de modo probabilístico y mueren muchas de ellas con el paso del tiempo, la respuesta del cerebro es altamente fiable. Frente a cambios importantes de pH y de temperatura, cambia la actividad eléctrica del cerebro y, sin embargo, no cambia en lo fundamental el comportamiento del individuo.

Como señala Granit,¹⁵ el cerebro tiene la capacidad de realizar determinada labor de diferentes modos utilizando circuitos diferentes, y es esta redundancia lo que le da su gran flexibilidad y le permite responder a situaciones nuevas disturbando de modo mínimo la respuesta a otras situaciones. Es esta redundancia, esta presencia de caminos cuasiequivalentes uno de los factores fundamentales en la fiabilidad y capacidad de aprendizaje del cerebro (ver fig. 1).

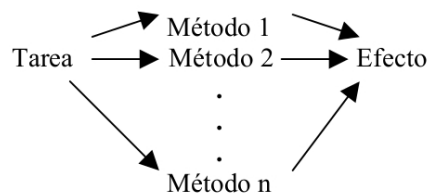


Figura 1

En el mismo sentido van los planteamientos de Luria;¹⁶ la respiración y la locomoción no deberían considerarse como funciones de un tejido aislado, sino como

¹⁵ R. A. Granit, *The Purposive Brain*. MIT Press, 1978.

¹⁶ A. R. Luria, “Neuropsychology: Its Sources, Principles and Prospects”. En *The Neurosciences: Paths of Discovery*. MIT Press, 1975.

“sistemas funcionales” complejos en los que la tarea constante (invariante) lleva a un efecto constante (invariante) a través del uso de métodos intercambiables (variado).

Tenemos pues que el estudio de sistemas materiales diferentes del “mecanicismo taylorista” sugieren la compatibilidad entre fiabilidad local baja y fiabilidad global alta y la importancia de la presencia de caminos redundantes, cuasiequivalentes, en vez de un solo camino como condición básica de flexibilidad y aprendizaje.¹⁷

Podría comentarse que una organización basada en una fiabilidad local relativamente baja sería poco eficiente; sin embargo, habría que recordar que, como señala Lévy-Leblond, en la producción científica capitalista el 90 % de los artículos publicados nunca son citados¹⁸ y que el porcentaje de descubrimientos de laboratorio que encuentran su aplicación en la industria está disminuyendo.¹⁹ En la producción científica capitalista tenemos un gran “desperdicio consumista” y, frente a esto, una organización productiva con fiabilidad local relativamente baja, pero en la que la mayoría de lo producido fuese utilizado, pudiese resultar mucho más eficiente. (Aunque a diferencia de la “eficiencia” en el capitalismo, en el que se trata de producir cada vez más mercancías o valores de cambio y acelerar la acumulación capitalista, se trataría de producir valores de uso que mejoren la calidad de la vida de todos).

Aunque esta problemática ameritaría un estudio detallado, se sugiere que el conocimiento por parte de cada uno de los investigadores, de los rasgos principales de los proyectos de investigación y de su propósito, es condición necesaria para poder absorber o rechazar selectivamente las “piezas” producto del trabajo de otros individuos de la sociedad.

En ese sentido puede mencionarse cómo trabajan algunas comunidades indígenas primitivas, sudamericanas. Junto al río Paraná viven comunidades indias conservando tecnologías y modos de vida de la “edad de piedra” y en particular saben tallar hachas. Sin embargo, en esta labor de tallado conservan no sólo el hacha sino también otros fragmentos para utilizarlos como herramientas para diversas labores. Aunque no hay que olvidar las diferencias que separan estas comunidades primitivas de las sociedades complejas capitalistas, el ejemplo anterior sugiere que estudios antropológicos de diversas sociedades pueden servir de ayuda en una organización productiva alternativa.

Por otro lado, es importante señalar la complejidad interdisciplinaria de la problemática del mundo actual, complejidad que creemos será igual o mayor en una futura sociedad comunista. Se interrelacionan las ciencias naturales, la técnica y la dinámica socioeconómica, jugando un papel importante el estudio de los flujos de energía, materiales e información y de los sistemas de organización y control tanto en las sociedades humanas como en los ecosistemas asociados a ellas. En muchos

¹⁷ En realidad la cadena de montaje funciona porque el obrero tiene una pericia mayor que la que en principio implica dicha cadena, pudiendo responder de modo diferente ante situaciones de emergencia.

¹⁸ J. M. Lévy-Leblond, “La ideología en la/de la física contemporánea”. En *La radicalización de la ciencia*. H. y S. Rose (eds.). Ed. Nueva Imagen, 1980.

¹⁹ J. M. Lévy-Leblond, *ibid.*

de estos casos nos enfrentaremos a sistemas complejos abiertos, con un número muy grande de factores, fuertemente interrelacionados entre sí, siendo muy importante la dimensión histórica y de difícil reproducibilidad.

Frente a estas tareas, el método científico galileano muestra limitaciones, ya que tiene como uno de sus elementos básicos el “experimento”, que no es una simple observación de la naturaleza, sino la reproducción en el laboratorio de la naturaleza misma; una reproducción depurada de “accidentes”. Se buscan los factores que se consideran importantes (esperando que sean pocos), se dejan de lado los demás como colaterales (cuya influencia se espera sea pequeña y quizás no contribuyan de modo sistemático) y en virtud de esto se llevan a cabo experimentos en los que se varían los factores principales. En este contexto la predictibilidad, el poder predictivo de la teoría, está fuertemente asociada a la reproductibilidad que implica la posibilidad de distinguir entre causas y efectos, de medir las magnitudes en juego separándolas unas de otras, de confrontar los resultados de un experimento con los de otro, sin tomar en cuenta el tiempo o el espacio que los separan. Estas condiciones no se darían en los problemas mencionados anteriormente, y se necesitarán alternativas que complementen y en parte substituyan al método galileano.

En ese sentido, vale la pena mencionar lo que Ginzburg llama *paradigma indiciario*.²⁰

lo que caracteriza este saber es la capacidad de remontarse de datos experimentales sin importancia aparente a una realidad compleja no experimentable directamente. [... la] proposición de un método interpretativo basado en los desechos, en datos marginales considerados como reveladores... en que trazos casi infinitesimales permiten alcanzar una realidad más profunda de otro modo inalcanzable.

Es el método de los cazadores y de los marineros, el método detectivesco de Sherlock Holmes en el que a partir de indicios, de pistas casi invisibles se reconstruye lo que ha pasado y en el que se infieren las causas a partir de algunos de sus efectos. Es el método de la semiótica médica en que a partir de los síntomas se infiere la enfermedad, no alcanzable directamente.

Es importante en la paleontología, la arqueología y la historia y en los estudios de la evolución prebiótica y biótica. Es en gran parte el método de la cosmología y del estudio de objetos astronómicos, como los hoyos negros.²¹ El paradigma del rigor elástico, de tener “olfato”, golpe de ojo e intuición.

Asociado a esto tenemos la dualidad intuicionismo analógico/racionalismo lógico. En la enseñanza e investigación en la formación social capitalista, y en particular en la física, se suele dar mucha más importancia a la formulación lógica-matemática que al razonamiento intuitivo y por analogía; a pesar de que la innovación surge casi exclusivamente del uso apropiado de la analogía. Esto no es de extrañar, ya que el método intuitivo analógico necesita, por un lado, una preparación horizontal (que sirva de base a la “comparación analógica”) y por otro,

²⁰ C. Ginzburg, “Spie. Radici di un paradigma indiziario”. En *Crisi della Ragioni*. Ed. Einaudi, 1979.

²¹ B. Giorgini, “Paradigma indiziario e black holes”, *Testi e Contesti*, no. 5, p. 29, 1981.

un rigor crítico a toda prueba; elementos casi ausentes en el trabajo parcializado y alienado característico de la investigación mayoritaria en la formación social capitalista y en la metodología y contenido de la enseñanza que conduce a tales investigaciones.

Creemos, pues, que los aspectos intuitivos analógicos deben ser reforzados y tomados como un punto de partida en una ciencia alternativa.

Por último, comentaremos la dualidad cuantitativo/cualitativo. Como hace notar Brush,²² en general está asegurado un lugar en los textos científicos sólo a aquellos pocos afortunados cuyo nombre se asocia con el descubrimiento de leyes cuantitativas o constantes universales. Aquéllos que descubren un hecho o concepto cualitativo, aunque hayan empleado métodos experimentales e ingeniosos, corren el riesgo de ser olvidados. Este hecho es coherente con el énfasis en la fiabilidad local, expresado en la exactitud cuantitativa, que comentábamos antes. Se pone énfasis en lo cuantitativo y se considera la riqueza cualitativa de la naturaleza como secundaria y menos importante.

Siguiendo los planteamientos de este capítulo, se ocurre tomar como punto de partida el de la riqueza cualitativa y pobreza cuantitativa, asociando esta última a un número limitado de repertorios realizables quizás por computadoras relativamente pequeñas y fáciles de manejar.

Como comentario final de los planteamientos teóricos de esta sección, queremos señalar que sería necesaria una síntesis de las dualidades: fiabilidad global/fiabilidad local, paradigma indicial/paradigma galileano, intuicionismo analógico/racionalismo lógico, y cualitativo/cuantitativo.

Dado que en la formación social capitalista se suele privilegiar el segundo miembro de estas dualidades, coherentemente con nuestro planteamiento de tomar como punto de partida que pueda servir de "aproximación cero" de un análisis, el opuesto de los puntos de vista dominantes en el capitalismo, proponemos empezar por el primer miembro de dichas dualidades.

ALGUNOS COMENTARIOS OPERATIVOS

Basados en los planteamientos anteriores, presentaremos algunos comentarios operativos que esperamos puedan ser de utilidad como guías para la acción en las condiciones de un país capitalista dominado como es el caso de México.

En las condiciones concretas de nuestro país no se trata de discutir las características de una revolución cultural en gran escala, sino más bien de ver cómo los estudiantes, profesores e investigadores de las ciencias naturales pueden proporcionar a los habitantes de las comunidades populares rurales o urbanas elementos de juicio para que puedan incidir en decisiones tales como la problemática energética y ecológica, los reactores nucleares, los medios de comunicación y control de la información, los límites de la ciencia y de la técnica en estos problemas, etc. El comprender los diversos aspectos de estos problemas y el actuar para cambiarlos en la dirección que crean justa constituirán elementos importantes de una

²² S. G. Brush, *The kind of motion we call heat*. North Holland, 1976.

ciencia popular alternativa, y es claro que para que los estudiantes y profesores de una facultad de ciencias naturales puedan contribuir a esta tarea es necesario que tengan conocimiento de dichas problemáticas, cosa que no sucede con los presentes planes y programas de estudio e investigación. Se necesitaría pues modificarlos para poder llevar a cabo una “extensión universitaria activa” (con la palabra “activa” queremos significar que las comunidades populares no deben ser meros receptores pasivos de cultura científica de la que la Universidad sería el emisor, sino que deben aprender activamente, realizando estimaciones e investigaciones *in situ*). Aunque el abanico de esta “extensión universitaria activa” puede ser grande, creemos que debe jugar un papel fundamental el análisis crítico del flujo de materiales, energía e información en los procesos sociales de producción y en los ecosistemas asociados, entendiendo por flujo de información no su medida en bits sino principalmente su papel en la organización y control sociales.

Como comentábamos anteriormente, las características de los planes y programas actuales de estudio e investigación de la Facultad de Ciencias e institutos de ciencias naturales de la UNAM poco ayudan a tal extensión universitaria activa. Por citar un elemento, con frecuencia el investigador empieza a investigar en su tesis doctoral cuando tiene cerca de 30 años, y se suele considerar que las preocupaciones interdisciplinarias o sobre la relevancia social de su trabajo, son sólo obstáculos en la carrera de un investigador productivo. Esto es difícilmente consistente con que las comunidades populares comprendan su problemática y realicen estudios respecto a ellas, siendo en ello ayudadas por los estudiantes e investigadores de las ciencias naturales. Tenemos pues que los planes y programas de estudios de las facultades de ciencias deberían ser modificados para que el estudiante pueda comprender desde temprano los problemas complejos que se presentan y realizar estimaciones e investigaciones preliminares. Con tal objeto creemos que el poner al principio más énfasis en lo cualitativo que en lo cuantitativo, en el intuicionismo analógico más que en el racionalismo lógico, en el paradigma indicial más que en el galileano y en la comprensión global de los diversos factores más que en la capacidad de resolución local son puntos importantes (sin que el privilegiar los primeros miembros de las dualidades anteriores implique excluir los segundos).

Como punto final quisiéramos señalar que aunque los comentarios anteriores se refieren a ciencia popular en comunidades concretas de nuestro país, consideramos una falsa disyuntiva el contraponer la ciencia internacional frente a la ciencia que trate los problemas nacionales de las clases explotadas. Creemos que las líneas de separación corren entre clases más que entre países y que frente a la ciencia internacional al servicio del capital debemos contraponer la ciencia internacional por y al servicio de las clases explotadas; aprendiendo de y colaborando con las experiencias de los diferentes países. En esto, el ejemplo del pueblo vietnamita que pudo vencer a una de las maquinarias bélicas más poderosas en la historia de la humanidad, pudiera darnos más de una lección y permitirnos, razonando por analogía, llegar a conclusiones operativas.

VIETNAM

El pueblo vietnamita a lo largo de la historia ha sabido derrotar a ejércitos invasores. En los siglos XII, XIII, XV, y XVIII, derrotaron ejércitos enviados por diversas dinastías imperiales chinas. A finales del siglo XIX se sublevan contra las tropas de ocupación francesa, pero después de 10 años de dura lucha son derrotados por los franceses. En este siglo luchan contra la ocupación japonesa, derrotan en 1954 a los franceses en Dien Bien Fu, y en 1975 liberan Vietnam del Sur tras años de lucha con el ejército de Estados Unidos y con lo más moderno de su tecnología bélica.

Entre los factores importantes que llevaron al pueblo vietnamita al triunfo tenemos los siguientes:

1. Las comunidades campesinas del modo de producción asiático presentan aspectos solidarios y comunitarios muy marcados (el individualismo burgués y el anarquismo pequeño-burgués les resultan extraños) y a lo largo de la historia han mostrado una gran capacidad de resistencia frente a la agresión. Sin embargo, eran estáticas, mirando hacia el pasado; jugando el confucianismo un papel importante tanto en los aspectos comunitarios como en el carácter estático. El partido comunista vietnamita supo mantener los aspectos comunitarios de las formaciones campesinas, eliminó factores de explotación y repartió la tierra de los propietarios y reemplazó la ideología estática del confucianismo por la dinámica del marxismo. Esto permitió en gran parte pasar directamente de las estructuras campesinas del modo de producción asiático a estructuras socialistas.
2. Se operó de modo sincronizado en el campo y en la ciudad.
3. Se procuró que todo el pueblo tuviera claro por lo que se luchaba y los métodos de lucha. Esto permitió capacidad de resistencia, flexibilidad en la táctica e independencia respecto a los mandos.
4. Una gran tenacidad y capacidad para operaciones que dependían del esfuerzo sincronizado colectivo, de lo que Dien Bien Fu es un ejemplo.
5. Aparte de técnicas y trampas empleadas tradicionalmente por el pueblo vietnamita a lo largo de su historia, supieron diseñar y utilizar armamento sofisticado, adecuado a los problemas que enfrentaban (por ejemplo, cohetes precisos y de gran alcance, de fácil manejo y resistentes a las condiciones del trópico). Sin este armamento de "alto contenido científico" no hubiesen podido vencer a la maquinaria bélica americana.

Razonando por analogía podemos plantear algunos puntos para una ciencia popular alternativa:

1. Mantener el carácter comunitario de las formaciones sociales campesinas modificando las técnicas "artesanales", en general estáticas y conservadoras, por técnicas más dinámicas, flexibles, aunque de fácil manejo, dejando

de lado hasta donde sea posible la ciencia y la tecnología taylorizada. Sin embargo, en el caso de las “comunidades campesinas mexicanas” (por ejemplo en Oaxaca y Chiapas), a diferencia de Vietnam se presenta el problema del aislamiento social en el que viven, ya que con frecuencia cada comunidad se cree “nación independiente”, incluso de sus pequeñas comunidades similares. Habría que romper este aislamiento y unificar estas comunidades bajo una posición de clase a escala de todo el país.

2. No olvidar que en un país como México deben darse respuestas tanto a nivel urbano (por ejemplo la Ciudad de México) como rural (por ejemplo en Oaxaca y Chiapas).
3. Se necesita que tanto los científicos como el pueblo en general tengan conciencia clara tanto del tipo de sociedad que se quiere, como de los rasgos generales de las interrelaciones entre las diversas disciplinas científicas y entre éstas y la problemática social concreta. Esto ayudará tanto a absorber o rechazar selectivamente los diversos aspectos de la ciencia y de la técnica como a encontrar soluciones originales.
4. Tenacidad y énfasis en el trabajo colectivo.
5. No olvidar que si queremos no sólo una vida igualitaria, sino también rica “cuantitativa y cualitativamente”, aun conservando los rasgos positivos del “pasado” necesitaremos una ciencia y una técnica, quizás, tanto o más sofisticada que la de la formación social capitalista, pero coherente con las características de una sociedad comunista.

LA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA UNAM Y LA CIENCIA POPULAR

Los autores de este trabajo formamos parte del personal académico de la Facultad de Ciencias de la UNAM, donde en más de una ocasión se ha planteado la necesidad de orientar la investigación y la docencia hacia la resolución de los problemas de las clases y grupos explotados de nuestro país; teniendo esto en mente, a continuación presentaremos algunos comentarios al respecto:

1. La formación social mexicana es una formación heterogénea, no sólo por ser una formación social clasista sino porque tenemos desde grandes concentraciones industriales urbanas, como la Ciudad de México, grandes áreas rurales, y regiones campesinas indígenas como en los estados de Oaxaca y Chiapas. Los planteamientos de una ciencia y una técnica alternativas, de un saber y poder populares, deben tomar en cuenta esta heterogeneidad.
2. Dentro de la formación social capitalista juega un papel cada vez más importante lo referente al flujo de materiales, energía e información en los procesos sociales de producción y en los ecosistemas asociados a estos. Por información no entendemos sólo una estimación cuantitativa de ésta en bits sino su

expresión en un contexto específico y sus implicaciones como medio de organización y control. En el momento actual el control del comportamiento del hombre no depende sólo de la posición en el proceso de trabajo, sino que los llamados medios de comunicación de masas juegan un papel fundamental en el control de la conducta y en cómo todos los aspectos de la vida del hombre son objeto potencial de lucro capitalista.

3. A lo largo de la historia de la humanidad, los diversos aspectos de la concepción del mundo han estado interrelacionados y han sido más o menos coherentes con las necesidades de las clases y grupos. Aunque en la situación actual de nuestro país, la resolución de los problemas inmediatos y apremiantes de las clases y grupos explotados debe jugar un papel primordial, creemos que sería un error craso el considerar que son problemas secundarios y que se pueden dejar para más tarde lo referente a la estructura y dinámica del universo y de los "niveles microscópicos" de la materia y los aspectos de la dinámica de los organismos vivos "que no parezcan aplicables de modo inmediato". Este enfoque inmediatista implica olvidar que en el tránsito a una sociedad sin clases todos los aspectos de la concepción del mundo sufrirán probablemente cambios radicales y que el no abordar estos aspectos implica en la práctica quedarse con y absorber acríticamente las concepciones dominantes sobre el universo, la materia inanimada, los organismos vivos, etc.
4. En la formación social capitalista actual las grandes mayorías tienen un conocimiento estático, pasivo, fragmentario, semimágico y de "aunque usted no lo crea" de las ciencias naturales. Un elemento importante hacia una ciencia popular es transformar esto en un conocimiento dinámico, integrado y activo, incluyendo éste los condicionamientos sociales y los límites de las concepciones actuales de las ciencias naturales como prerrequisito para una contribución colectiva a su cambio.
5. Como comentábamos en páginas anteriores, para que los estudiantes, profesores e investigadores de la Facultad de Ciencias de la UNAM contribuyan de modo efectivo dentro de su profesión al cambio social, se necesitan cambios importantes en los planes y programas de estudio e investigación. Debe quedar bien claro que dado lo complejo de los objetivos que se persiguen, en una época de transición hacia una sociedad igualitaria, estos planes y programas alternativos implican más trabajo, tanto para profesores y estudiantes, así como mayor tenacidad y continuidad en los esfuerzos.
6. Las formaciones campesinas cerradas (especialmente aquellas indígenas de los estados del sur de México) presentan características comunitarias y resistencia a la penetración capitalista, pero son muy pobres y conservadoras. Cabe señalar la importancia numérica de estas comunidades indígenas (alrededor de 26 millones) y su importancia social y política, ya que en gran parte se encuentran en el sur de México, donde las contradicciones sociales son más graves y en conexión con la región explosiva que es Centroamérica

actualmente. Por otro lado, como señalábamos anteriormente, a diferencia de las comunidades del sudeste asiático, estas comunidades indígenas mexicanas se sienten comunidades aisladas del medio exterior (¡aunque tengan 40 personas!) y tendrían que integrarse entre sí en base a la lucha de clases a escala nacional, sin perder sus valores comunitarios. El aumentar el nivel de vida cuantitativo y cualitativo de estas comunidades y el “dinamizar” su concepción del mundo, conservando las características igualitarias, implica problemas teóricos en los que puede contribuir la Facultad de Ciencias. Y por otro lado, basta recordar el papel de los intelectuales en las comunidades campesinas del sudeste asiático para comprender que los universitarios podrían jugar un papel activo importante. Sin embargo, necesitarían estar identificados con las costumbres de estas comunidades y ser conscientes de las represiones que pueden sufrir, por lo que creemos que no puede ser la base mayoritaria de un servicio social y extensión universitaria activas de la Facultad de Ciencias.

7. En lo referente a comunidades urbanas, los problemas de contaminación, energética, alimentación, medios de información y control de masas, importancia y limitaciones de las ciencias naturales, etc., creemos pueden servir de base de una extensión universitaria y servicios sociales activos. También lo referente al cambio de la concepción del mundo fragmentaria y semimágica, por una dinámica e integrada (ver inciso 4). La combinación de esta extensión universitaria activa con manifestaciones artísticas (por ejemplo, funciones de títeres sobre temas científicos) es otro punto a analizar.
8. En comunidades rurales abiertas la problemática ecológica o energética (por ejemplo, discutir lo referente a energía nuclear) puede ser importante.
9. Dentro de los planes y programas de estudio de la Facultad de Ciencias creemos que un tronco común con énfasis en los sistemas dinámicos abiertos y el concepto de máquina generalizada, en la ecología y la evolución biológica, y en las ecuaciones de diferencias, mapeos, estadística, y cálculo numérico, así como en la interacción de ciencia-sociedad puede ser un buen punto de partida (esto será analizado en otro trabajo).

⊙ *Esta es una página en blanco.* ⊙

ALGUNOS TÓPICOS SOBRE LO FORMAL Y LO INFORMAL EN LA UNIVERSIDAD CONTEMPORÁNEA *

EN el momento actual, con el dominio de ese capitalismo salvaje que denominan neoliberalismo, vale la pena recordar tres contradicciones estructurales del capitalismo: a) La contradicción entre la propiedad privada de los medios de producción y el carácter social de las relaciones de producción; b) la contradicción entre la necesidad de restringir al máximo la libertad en el proceso de trabajo (para poder controlarlo más fácilmente) y la necesidad de libertad para que la labor de los subordinados sea creativa y c) el que con el avance de la ciencia y la técnica existen las condiciones para que los seres humanos sean muy creativos individual y socialmente y que, sin embargo, en promedio la gente es cada vez más ignorante y menos creativa. Podemos decir que en el capitalismo actual se considera al hombre como “el medio que tiene la mercancía para producir más mercancías”, estorbando lo que no esté asociado a este propósito.

En este trabajo discutiremos algunos tópicos que podrían ayudar al tránsito a una sociedad diferente, más justa y creativa, y en particular, propondremos algunas labores que creemos pueden implementarse en las universidades públicas.

POLÍTICA ORGANIZATIVA, CAMBIO RÁPIDO Y OBSOLESCENCIA

A lo largo de la historia ha existido una interrelación entre la visión del mundo y sus conceptos básicos por un lado y el modo y estructura de la producción por otra. Durante mucho tiempo, en que lo importante era la agricultura y la ganadería, se puso el énfasis en la estructura y movimiento de la materia. Posteriormente, con la revolución industrial inglesa y las revoluciones políticas en Inglaterra y Francia, adquiere importancia lo referente a la energía y su conservación. Nace la termodinámica. Asociado al flujo y transformaciones de la energía se tiene la electricidad y el motor de explosión, el petróleo y el automóvil. Antes, en el siglo XIX, con Maxwell se unifica la electricidad, el magnetismo y la luz, y a finales del siglo XIX y comienzos del XX se tienen las revoluciones científicas asociadas a la física cuántica y a la relatividad. Estas dos revoluciones no sólo cambiaron nuestra visión del mundo, sino que eventualmente implicaron revoluciones tecnológicas. Sin embargo, hasta mediados del siglo XX lo básico era la materia y la energía, su flujo y sus transformaciones.

* Originalmente escrito para el libro colectivo e inédito: Vizcaya, E. y Cocho, F. (coords.), 2005. *cGh-unam: nuevas senderos y viejas cargas. Análisis en torno a la huelga universitaria 1999-2000*. México.

A partir de los cincuenta, con las primeras computadoras de bulbos, voluminosas y lentas, pero capaces de llevar a cabo cálculos científicos y tecnológicos (básicamente militares) en un tiempo razonable, se inicia la era de la información, la revolución informática.

Ante la enorme cantidad de información, en la práctica, la mayor parte es *ruido*. Se necesita tener la capacidad de filtrar la información y utilizar ésta para alcanzar metas específicas, en otras palabras, necesitamos poder separar aquella parte de la información que sirve como conocimiento. Estamos en la sociedad del conocimiento.

Finalmente, en el momento actual resulta fundamental la política organizativa, la estructura y dinámica de las redes biológicas y humanas. El conocimiento de los diversos modos de organización, de sus ventajas y desventajas son fundamentales en la época actual en que podríamos decir que “las relaciones de producción se vuelven las principales fuerzas productivas”.

Como comenta Wallerstein:

Antes de la Revolución Francesa [...] el cambio político era excepcional, justificable sólo excepcionalmente, y cuando ocurría no se pensaba que sentase precedente para cambios posteriores.

Después de 1848, todos los tipos de cambio, incluyendo cambios políticos, se consideraron “normales”. [...] Para los conservadores, el cambio “normal” debía ser tan lento como fuera posible y promovido sólo cuando se considerara necesario para evitar una rotura mayor del orden social [...] mientras que para ambos, liberalismo y socialismo, el cambio era deseable y aún inevitable (o progreso).

Los liberales creían que el curso del mejoramiento social debía ser uniforme, basado en una evaluación racional de los problemas existentes, realizada por especialistas y una labor continua y consciente de los líderes políticos a la luz de tal valoración, con el fin de introducir reformas sociales inteligentes.

Los socialistas eran escépticos respecto a la posibilidad de que los reformistas pudieran llevar a cabo cambios significativos a través de inteligencia y buena voluntad, y casi solo con el apoyo de ellos mismos. Los socialistas querían ir más rápido y creían que sin una presión popular considerable el proceso no daría lugar a progreso. El progreso era inevitable porque la presión popular era inevitable, y sin esta presión popular los especialistas se verían impotentes. (Wallerstein, 1995, pp.94-96)

Ha pasado el tiempo, y en el momento actual estamos en un mundo de cambios rápidos, quizá en lo que podríamos llamar una *revolución* permanente. Siguiendo con Wallerstein:

Hemos entrado en una nueva era en términos de mentalidades. Por un lado, tenemos una llamada apasionada por la democracia; sin embargo, esta llamada no es la del cumplimiento del liberalismo sino de su rechazo. Es la afirmación de que el sistema mundial actual no es democrático, ya que no se comparte por igual el bienestar económico debido a que el poder político no está igualmente

distribuido. La desintegración social, y no un progreso sistemático, es lo normal en el momento actual, y cuando hay desintegración social la gente busca protección.

En el pasado la gente vio al Estado como fuente de cambio seguro, pero ahora se dirigen a solidaridades de grupo (de todo tipo de grupos) en busca de protección. Esto es un juego diferente, y no es seguro cómo se jugará este juego en los próximos cincuenta años, pues, por un lado no sabemos cómo trabaja tal sistema, y por otro, las fluctuaciones de un sistema mundial en desintegración son muy grandes.

Navegaremos mal durante el periodo que se avecina si no somos conscientes de que ninguna de las ideologías (agendas para la acción política) que han gobernado nuestras acciones durante los últimos doscientos años han sido completamente útiles. Sin embargo, no podemos desecharlas radicalmente, pues nos serán muy provechosas en el futuro. Hay que tener en cuenta que el desorden que parece avecinarse no es necesariamente peor (o mejor) que el orden. Sin embargo, requiere un modo diferente de acción y reacción. (Wallerstein, 1995, pp.106-107)

En un mundo en cambio rápido, en revolución permanente, se tiene el problema de la obsolescencia del conocimiento. En su libro *Instrumental para o pensamiento*, Waddington propone lo siguiente:

Sería ser demasiado optimista el pensar que alguien sepa realmente lidiar con esta situación, la solución será probablemente alguna mezcla de:

- a) Enseñanza de principios generales que se volverán anticuados de un modo más lento.
- b) Métodos de enseñanza para buscar rápidamente y en una zona amplia la información fáctica actualizada que colocará carne sobre estos huesos cuando sea necesario aplicar.
- c) Métodos de enseñanza para clasificar la información en una jerarquía de categorías, de modo que los ítems relevantes a un contexto particular puedan ser filtrados rápidamente.
- d) Inducir motivaciones para continuar la autoeducación después de haber terminado el periodo de educación formal. Sin embargo, queda por estudiar lo que sería exactamente esta mezcla y cómo se alcanzarían estos propósitos. (Waddington, p.35)

Alvin y Heidi Toffler en su libro *Las guerras del futuro* discuten las características de lo que llaman *La tercera ola*, según la cual, dominaría cada vez más la dinámica de la sociedad actual. En particular, al referirse al *trabajo*, comentan:

La propia mano de obra se ha transformado. El trabajo muscular, poco calificado y esencialmente intercambiable, impulsó la segunda ola. La educación de masas de estilo fabril preparaba a los obreros para tareas rutinarias y repetitivas. En contraste, la tercera ola se presenta acompañada de una creciente imposibilidad de intercambio laboral a medida que aumentan vertiginosamente las destrezas requeridas.

La fuerza muscular es esencialmente fungible. Un obrero poco calificado que abandone su puesto o al que se despida puede ser reemplazado rápidamente y con pequeño coste. En cambio, los niveles crecientes de destrezas especializadas requeridas por la economía de la tercera ola hacen que sea más difícil y costoso hallar la persona precisa con la preparación adecuada.

Aunque pueda enfrentarse a la competencia de muchos otros trabajadores no calificados, un conserje despedido por una gran empresa relacionada con la defensa puede hallar un empleo [...] en una escuela o en una compañía de seguros. En contraste, el ingeniero electrónico que ha pasado años construyendo satélites no tiene necesariamente los conocimientos prácticos que precisa una firma de ingeniería ambiental. Un ginecólogo no será capaz de practicar la cirugía del cerebro. La creciente especialización y los cambios rápidos en las destrezas requeridas reducen la intercambiabilidad del trabajo. (Toffler, 1994, pp.87-96)

Se trata de un neotaylorismo, en que se tienen piezas independientes especializadas, cuya acción ordenan como creen conveniente quienes tienen el poder de decisión. Una alternativa es la que sugieren las proposiciones de Waddington frente a la obsolescencia, se trata de tener lo que podríamos llamar mil usos de alto nivel, capaces de responder y saber improvisar frente a las emergencias, lo que creemos adecuado en un mundo en cambio, en que lo importante es potenciar el potencial creativo del ser humano.

Existen estructuras organizativas informales coherentes con estas metas.

COMUNIDADES DE APRENDIZAJE, PRÁCTICA Y AYUDA MUTUA

Comunidades de práctica

Las comunidades de práctica son redes informales que coexisten con la estructura formal de las organizaciones y sirven para propósitos tales como resolver conflictos entre las metas de la institución a que pertenecen, resolver problemas de modo más eficiente y ayudar a alcanzar los objetivos de sus miembros.

A pesar de la falta de reconocimiento oficial, estas redes informales pueden dar lugar a modos efectivos de aprendizaje, proporcionar un sentido de pertenencia y, con los incentivos adecuados, aumentar la productividad de la organización formal.

Desde un punto de vista social, cuando estas redes informales aparecen generan sus propias normas, patrones de interacción, constituyendo lo que se ha denominado *comunidades de práctica*.

Uno quisiera encontrar los mecanismos generales comunes a estas comunidades de práctica y cómo dependen de variables como el tamaño y la diversidad de la organización, la capacidad de sus miembros para comunicarse entre sí, la naturaleza de los problemas que atacan, los incentivos que hacen que la gente se una a estas comunidades y la estructura y costo de sus medios de comunicación.

El número de individuos con los cuales cualquier miembro de la comunidad puede comunicarse dará lugar a diversos patrones de interacción, desde una es-

estructura uniforme en la que cada miembro se comunica con los demás, hasta una estructura en cúmulos en la que un individuo dado colabora con un número pequeño de miembros.

Uno quisiera saber también cómo evolucionan estas comunidades y de qué modo las estructuras resultantes dependen del tamaño del grupo y de la diversidad de habilidades presentes. Se debe tener en cuenta explícitamente que el éxito de un individuo que trata de resolver un problema puede a menudo facilitarse mediante el intercambio de información con otros miembros de la comunidad y que esta información, en general, no es perfecta e incluso puede ser inadecuada para la tarea.

Los individuos tienen que aprender a identificar aquellos miembros de la comunidad con los que la interacción será más fructífera, y con frecuencia esto resulta en un patrón de interacción en que la escala de interacción crece con la percepción de la utilidad mutua. Este patrón casi nunca es estático, porque aunque el problema no cambie, los individuos que hacen contribuciones importantes pueden variar con el tiempo.

Se pueden formular modelos matemáticos que tengan en cuenta la diversidad y el tamaño del grupo, la estructura de la red cuando el número de individuos cambia con el tiempo y la estabilidad frente a fluctuaciones. Se puede introducir un mecanismo de aprendizaje explícito que dé lugar a cambios locales en la estructura, mostrándose que estos cambios locales dan lugar a un mayor rendimiento de la comunidad como un todo.

Estas comunidades pueden implicar relaciones entre niveles jerárquicos o instituciones del mismo nivel. Un caso con implicaciones potenciales positivas es el de las relaciones de familia, de amistad o los hábitos y creencias comunes, que muchas veces implican puentes más efectivos que las relaciones formales. Como en otros casos de comunidades de práctica, éstas pueden implicar aspectos negativos, tales como las mafias, pero el tener en cuenta las relaciones humanas, más allá de las reglas formales, puede ser un punto de partida para las soluciones de muchos problemas.

Debe agregarse que, además de buscar soluciones y planteamientos generales en gran escala, es necesario poner en práctica organizaciones experimentales en pequeña escala que permitan recopilar información necesaria en la búsqueda de soluciones generales.

Existen diversas publicaciones sobre cómo organizar comunidades de práctica. En particular, en la página web: <http://www.icohere.com>, se pueden bajar los trabajos:

- “Creating Communities for Collaboration and Learning”, S. Kaplan y P. Bartlett.
- “Community of Practice Design Guide” (A step-by-step guide for creating collaborative communities of practice).

Estos trabajos pueden servir de guía para organizar comunidades de práctica en nuestra universidad.

Comunidades de ayuda mutua

Se ha dicho que existen tres categorías generales de transacciones para el intercambio de bienes y servicios:

- a) el intercambio del mercado, en que circulan los bienes y servicios sobre la base de la oferta y la demanda, sin generar relaciones sociales duraderas;
- b) la redistribución de bienes y servicios, que primero se concentran en un determinado individuo o institución, de donde fluyen hacia la comunidad o la sociedad, y
- c) la reciprocidad, es decir, el intercambio de favores y regalos que es parte integral de una relación social.

El tipo de intercambio que domina en las sociedades primitivas y tribales es la reciprocidad y la redistribución. El intercambio de mercado se encuentra limitado casi enteramente al comercio intertribal. La economía monetaria que caracteriza al intercambio de mercado sólo se generalizó en Europa hacia fines de la Edad Media y su preponderancia definitiva ha sido un resultado de la revolución industrial capitalista del siglo XIX. (Lomnitz, 1975, p.25)

Aunque, en general, se ha considerado el intercambio recíproco como algo propio de las sociedades primitivas, este intercambio recíproco, con base en la solidaridad, la confianza y la ayuda mutua, ha sido y es lo dominante en grupos sociales que viven en condiciones de marginalidad y que apenas sobreviven. Como menciona Kropotkin (1989, pp.262–294), tal fue el caso en la Inglaterra de finales del siglo XIX y lo es para comunidades marginales de nuestras ciudades (Lomnitz, 1975).

Los estudios y experiencias sobre las comunidades de aprendizaje y práctica podrían ayudar a una mejor organización de las comunidades de ayuda mutua. Por otro lado, aunque se tengan resueltos los problemas de sobrevivencia, en la sociedad neoliberal los seres humanos son cada vez más ignorantes y menos creativos y quizás, teniendo en mente dichas comunidades, se pudieran tener formas organizativas que potencien la creatividad individual y social. Para esto habría que tomar en cuenta lo referente a comunidades de práctica.

SOBRE EL CAOS Y SU CONTROL

El caos está asociado a sistemas dinámicos completamente deterministas, los cuales adquieren comportamientos aparentemente azarosos debido a una sensibilidad extrema a las condiciones iniciales y a las contingencias históricas; es lo que se identifica en la literatura científica como *caos determinista*. Este caos aparece en dinámicas no lineales, aunque la no linealidad no conduce necesariamente a un comportamiento caótico. Para diferenciar el caos del azar, y ambos de los sistemas deterministas que no dan lugar a comportamiento caótico, es útil el concepto de *horizonte de predictibilidad*.

En un sistema determinista no caótico si se tiene una diferencia muy pequeña en las condiciones iniciales se tendrá una diferencia pequeña entre las trayectorias dinámicas para cualquier momento en el futuro, por alejado que esté en el presente. Podemos decir que el horizonte de predictibilidad es infinito. En un sistema azaroso el horizonte de predictibilidad es nulo, en condiciones idénticas o casi idénticas no se puede predecir nada de lo que pasará en el momento siguiente. En el caso de los sistemas caóticos se tiene un horizonte limitado de predictibilidad, uno puede predecir lo que va a pasar hasta un cierto tiempo y después rápidamente se pierde la predictibilidad. Un ejemplo de esto es la predicción del tiempo, se puede predecir de modo bastante preciso el tiempo que hará mañana y pasado mañana, pero serán azarosas las predicciones del tiempo para dentro de dos semanas. Los sistemas caóticos, con horizonte de predictibilidad limitada, pueden controlarse si al acercarse al horizonte de predictibilidad uno actúa sobre el sistema, de modo que esta actuación periódica, asegura su trayectoria dinámica.

Lo anterior es importante en los modelos de la dinámica social, ya que en general, un sistema complejo social tiene con frecuencia dinámicas caóticas, sensibles a las contingencias históricas y con horizonte de predictibilidad relativamente pequeño, lo que implica la necesidad de control periódico. Sin embargo, para poder controlar dicho sistema social complejo se suele necesitar mucha información, que suele estar en las manos de quienes controlan el poder político y económico. Coherente con lo anterior, en tiempos recientes se habla menos de planeación y más de evaluación. Para tener un verdadero poder popular se necesita que el pueblo tenga la información necesaria para llevar a cabo las medidas de control adecuadas.

Como comenta M. Harris en el párrafo final de su libro *Caníbales y reyes*, en sección titulada "Epílogo y soliloquio moral":

Puesto que los cambios evolutivos no son plenamente predecibles, es obvio que en el mundo cabe lo que llamamos libre voluntad. Cada decisión individual de aceptar, resistir o cambiar el orden actual altera la probabilidad de que se produzca un cambio evolutivo específico. En tanto el curso de la evolución cultural nunca está libre de la influencia sistemática, probablemente algunos momentos son más *abiertos* que otros. Considero que los momentos más abiertos son aquellos en los que un modo de producción alcanza sus límites de crecimiento y pronto debe adoptarse un nuevo modo de producción. Estamos avanzando rápidamente hacia uno de esos momentos de apertura. Cuando lo hayamos atravesado, y sólo entonces, al mirar hacia atrás, sabremos por qué los seres humanos eligieron una opción y no otra. Entretanto, la gente que tiene un profundo compromiso personal con una determinada visión del futuro está plenamente justificada en la lucha por sus objetivos, aunque hoy los resultados parezcan remotos e improbables. En la vida, como en cualquier partida cuyo resultado depende tanto de la suerte como de la habilidad, la respuesta racional en caso de desventaja consiste en luchar con más vehemencia. (Harris, 1986, p.247)

LA LUCHA DEL PUEBLO VIETNAMITA

El pueblo vietnamita a lo largo de la historia ha sabido derrotar a ejércitos invasores. En los siglos XII, XIII, XV y XVIII, derrotaron ejércitos enviados por diversas dinastías imperiales chinas. A finales del siglo XIX se sublevan contra las tropas de ocupación francesa, pero después de diez años de dura lucha son derrotados por los franceses. En el siglo XX luchan contra la ocupación japonesa, derrotan en 1954 a los franceses en Dien Bien Fu, y en 1975 liberan Vietnam del Sur tras años de lucha con el ejército de Estados Unidos y con lo más moderno de su tecnología bélica.

Entre los factores importantes que llevaron al pueblo vietnamita al triunfo tenemos los siguientes:

1. Las comunidades campesinas del modo de producción asiático presentan aspectos solidarios y comunitarios muy marcados (el individualismo burgués y el anarquismo pequeño-burgués les resultan extraños) y a lo largo de la historia han mostrado una gran capacidad de resistencia frente a la agresión. Sin embargo, eran estáticas, mirando hacia el pasado, jugando el confucionismo un papel importante tanto en los aspectos comunitarios como en el carácter estático. El partido comunista vietnamita supo mantener los aspectos comunitarios de las formaciones campesinas, eliminó factores de explotación y repartió la tierra de los propietarios, reemplazando la ideología estática del confucionismo por la dinámica del marxismo. Esto permitió en gran parte pasar directamente de las estructuras campesinas del modo de producción asiático a estructuras socialistas.
2. Se operó de modo sincronizado en el campo y en la ciudad.
3. Se procuró que todo el pueblo tuviera claro por lo que se luchaba y los métodos de lucha. Esto permitió capacidad de resistencia, flexibilidad en la táctica e independencia respecto a los mandos.
4. Una gran tenacidad y capacidad para operaciones que dependían del esfuerzo sincronizado colectivo, de lo que Dien Bien Fu es un ejemplo.
5. Aparte de técnicas y trampas empleadas tradicionalmente por el pueblo vietnamita a lo largo de su historia, supieron diseñar y utilizar armamento sofisticado, adecuado a los problemas que enfrentaban (por ejemplo, cohetes precisos y de gran alcance, de fácil manejo y resistentes a las condiciones del trópico). Sin este armamento de "alto contenido científico" no hubieran podido vencer a la maquinaria bélica norteamericana.

Razonando por analogía, se pueden plantear algunos puntos para acciones populares alternativas en México:

1. Mantener el carácter comunitario de las formaciones sociales campesinas modificando las técnicas "artesanales", en general estáticas y conservadoras, por técnicas más dinámicas, flexibles, aunque de fácil manejo, dejando

de lado hasta donde sea posible la ciencia y tecnología taylorizadas. La labor de los zapatistas en Chiapas es una labor de este tipo, con el empleo de la red de Internet como ejemplo de utilización de la tecnología avanzada.

2. No olvidar que en un país como México deben darse respuestas tanto a nivel urbano (que es el dominante) como rural (por ejemplo en Oaxaca y Chiapas).
3. Se necesita que tanto los científicos como el pueblo en general tengan conciencia clara tanto del tipo de sociedad que se quiere, como de los rasgos generales de las interacciones entre las diversas disciplinas científicas y entre éstas y la problemática social concreta. Esto ayudará tanto a absorber o rechazar selectivamente diversos aspectos de la ciencia y de la técnica como a encontrar soluciones originales.
4. Tenacidad y énfasis en el trabajo colectivo.
5. No olvidar que si queremos no solo una vida igualitaria, sino también rica "cuantitativa y cualitativamente", aun conservando los rasgos positivos del "pasado", necesitaremos una ciencia y una técnica quizás tanto o más sofisticada que la de la formación social capitalista, aunque coherente con las características de una sociedad comunista.

ALGUNAS ACTIVIDADES INFORMALES EN LA UNIVERSIDAD

Como proposiciones concretas a llevar cabo en las universidades públicas, y en particular, en la UNAM, podemos mencionar:

- El estudiante que ingresa a la UNAM, en general, ignora tanto los logros académicos, como las luchas académico-políticas de nuestra universidad. Hay que recuperar la historia de las tradiciones académicas y de lucha de nuestra casa de estudios. Esto haría que los estudiantes tengan "amor a la camiseta" y llegado el momento puedan seguir el ejemplo de lo acaecido en el pasado. En el caso de la Facultad de Ciencias se tiene tanto lo referente a ciencia de frontera como la historia de los movimientos político-académicos a los que estuvo asociada.
- En general, el estudiante ingresa a la universidad con una preparación muy deficiente. Es difícil para la universidad resolver este problema, que depende de los programas y su implementación en la enseñanza primaria y media. Sin embargo, podrían organizarse seminarios y otros mecanismos para que mejoren su preparación grupos de estudiantes motivados.
- El estudiante que ingresa a nuestra universidad, y en particular a nuestra Facultad de Ciencias, suele tener un conocimiento estático, pasivo, fragmentario, semimágico y de "aunque usted no lo crea" de las ciencias naturales. Es necesario que se vean en el primer semestre temas de las fronteras científica

y humanística. En el caso de la ciencia se incluirían tanto los descubrimientos de frontera de la ciencia básica, como los aspectos en que la ciencia puede ayudar a las comunidades populares urbanas y campesinas.

Se trataría de utilizar mecanismos de amplificación, preparando discutidores que luego con un grupo discutan la temática. Podrían ser estudiantes graduados, con *una mística*. Los estudiantes, a su vez, difundirían este conocimiento en las comunidades en que viven. Si uno quiere interaccionar con gente fregada, las familias de una gran parte del estudiantado cumplen con este requisito. Se podrían emplear las medidas organizativas asociadas a la creación de comunidades de aprendizaje, práctica y ayuda mutua presentadas anteriormente.

En la Universidad Autónoma de la Ciudad de México se está tratando de implementar una comunidad de estudio y practica respecto a la diabetes, teniendo en mente los mecanismos de amplificación anteriores. Se podría hacer algo similar en la UNAM.

Se podría intentar crear un proyecto académico del tipo de los Grupos Universitarios Interdisciplinarios, con el posible nombre de "Comunidad de estudio de lo informal en la universidad contemporánea". Como parte de sus labores interaccionaría con lo anterior y sincronizaría algunas de las tareas de las comunidades de aprendizaje, práctica y ayuda mutua.

BIBLIOGRAFÍA

- Harris, M. (1986), *Caníbales y reyes: el origen de las culturas*. Barcelona: Salvat.
- Kropotkin, P. (1989), *Mutual aid: A factor of evolution*. Montreal: Black Rose Books.
- Lomnitz, L. A. de (1975), *Cómo sobreviven los marginados*. México: Siglo XXI.
- Toffler, A. y H. Toffler (1994), *Las guerras del futuro: La supervivencia en el alba del siglo XXI*. Barcelona: Plaza & Janes.
- Waddington, C. H. (1979), *Instrumental para o pensamento*. Editorial de la Universidad de Sao Paulo, Brasil. Traducción del autor.
- Wallerstein, I. (1995), *After Liberalism*. Nueva York: The New Press. Traducción del autor.

CIENCIA: CRISIS DE LA RAZÓN Y SINRAZÓN*

EN la historia occidental de las ideas suele destacarse la importancia del cambio asociado con el programa del enciclopedismo francés que sería la base intelectual de esa gran irrupción del espíritu humanista que fue la Revolución Francesa que quería, en sus orígenes, transformar el mundo en lo cultural, lo político y lo económico para convertirlo en un lugar donde el hombre no fuese más el lobo del hombre.

Aquel programa articulaba los avances de la ciencia y el humanismo que germinaron y crecieron en Europa desde el siglo XV, el *Quattrocento* renacentista, hasta el ilustrado *Siglo de las Luces* y postulaba que si se quiere descubrir la verdad, interrogar a la naturaleza y comprender el mundo, es necesario dudar por sistema, seguir los caminos de la razón y contrastar los resultados con lo que se puede observar o medir.

Más aún, el ejercicio de esta capacidad liberaría a los hombres y las mujeres de prejuicios y supersticiones y les permitiría sobreponerse a la opresión a la que los habían sometido los señores feudales, los aristócratas y las jerarquías eclesiásticas; unos, encargados de imponer su dominio a sangre y fuego; los otros —hechos uno con los dueños del poder terrenal desde los inicios de la Edad Media—, dedicados a justificar ideológicamente el *status quo* y a controlar a los posibles disidentes mediante la tortura inquisitorial, en este mundo, o la amenaza del infierno por toda la eternidad, en el otro. Así, en el ensayo *Esquisse d'un tableau historique des progrès de l'esprit humaine*, el Marqués de Condorcet (1743-1794) —filósofo, matemático, politólogo y miembro de la *Société des gens de lettres* que publicara entre 1752 y 1772 *L'Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et de métiers*— se propone mostrar que:¹

... la Naturaleza no ha puesto límite al perfeccionamiento de las facultades humanas y que la perfectibilidad del hombre es verdaderamente infinita; que el avance de esta perfectibilidad —de ahora en adelante independiente de cualquier poder que quisiera oponérsele— no tiene mayor limitación que la duración del planeta en donde la Naturaleza nos ha puesto... Que llegará el día en que el sol brillará sólo para hombres libres que no conocerán más amo que su razón.

* Ensayo escrito por Germinal Cocho, José Luis Gutiérrez y Pedro Miramontes. Publicado en: Muñoz Rubio, J. (coord.), 2014. *Totalidades y complejidades: crítica a la ciencia reduccionista*. México: CEIICH-UNAM.

¹ Citado por René Dubos en *The Dreams of Reason*, p. 14.

A su vez, como sostiene Roberto R. Aramayo,² en su crítica de la razón, Immanuel Kant (1724-1804) la estatuirá como supremo tribunal que garantiza “sus pretensiones legítimas” y cancela “cualquier presunción infundada, no mediante argumentos de autoridad, sino a través de leyes eternas e inmutables que la propia razón posee” y, en su respuesta explícita a la pregunta, Kant mismo postulará:³

Ilustración significa el abandono por parte del hombre de una minoría de edad cuyo responsable es él mismo. Esta minoría de edad significa la incapacidad para servirse de su entendimiento sin verse guiado por algún otro. Uno mismo es el culpable de dicha minoría de edad cuando su causa no reside en la falta de entendimiento, sino en la falta de resolución y valor para servirse del suyo propio sin la guía del de algún otro. Sapere aude! ¡Ten valor para servirte de tu propio entendimiento! Tal es el lema de la Ilustración.

Así, es éste un proceso de crecimiento que lleva a los hombres, en su conjunto, a “verse en la situación” de “utilizar su propio entendimiento sin la guía de algún otro” si bien el filósofo de Königsberg reconoce, en el mismo ensayo, que su época no es todavía “ilustrada” sino de “ilustración” y, a su vez, Condorcet augura⁴ que este madurar desde los estadios primitivos y bárbaros del pasado remoto hasta la futura *Edad de la Razón*, haría progresar a los seres humanos en tres grandes líneas: (1) hacia la destrucción de la desigualdad entre las naciones; (2) hacia la destrucción de la desigualdad entre las clases sociales y (3) hacia su mejoramiento ininterrumpido e ilimitado en lo mental, lo moral y lo físico.

Es innegable que las expectativas de aquella ilustración no se han cumplido; desde luego, las desigualdades entre las naciones y entre las clases no sólo persisten, se acentúan intencionalmente según los designios de los grandes centros metropolitanos de poder: la miseria y el hambre en los países del Tercer Mundo y el deterioro de las condiciones de vida en los de la antigua zona de influencia soviética son propiciados por el gran capital transnacional, cuyo único interés en esas naciones es expoliar sus riquezas naturales y su baratísima fuerza de trabajo; las muchedumbres de seres humanos que subsisten en condiciones recurrentes de hambruna y de enfermedades endémicas ni siquiera son objeto de la codicia del mercado porque no tienen capacidad alguna de consumo.

Es cierto que la revolución científica de los siglos XVII y XVIII fue el fundamento desde el cual los seres humanos ampliaron sus capacidades para comprender y transformar su entorno como nunca antes,⁵ sus frutos han implicado, sí, la posibilidad de un progreso notable en el mejoramiento físico de los seres humanos: las condiciones sanitarias, la medicina preventiva, los avances médicos para tratar

² Confróntese en el “Estudio preliminar. Una filosofía moral de la historia” de Roberto R. Aramayo en Kant, Immanuel: *¿Qué es la Ilustración? Y otros escritos de ética, política y filosofía de la historia*, pp.7-8.

³ Cursivas del original. Véase el opúsculo kantiano de 1784 “Contestación a la pregunta: ¿Qué es la Ilustración?” en la p. 83. de Kant, Immanuel, *op. cit.*

⁴ La paráfrasis es de René Dubos, *op. cit.*, p. 52

⁵ Si bien, como se recuerda en este mismo ensayo, durante la “revolución olvidada” del mundo helenístico se habrían descubierto y aplicado muchos conocimientos cuya primera aparición se ubica en Europa y se data en los inicios del mundo moderno (véase “El antecedente helenístico”, *infra*).

enfermedades que, otrora, eran incurables o reducían dramáticamente la esperanza de vida; los beneficios técnicos de la electricidad y otras fuentes de energía que –al trasladar el esfuerzo humano a la operación de una máquina– mejorarían las condiciones de trabajo de los obreros; el aprovechamiento del conocimiento de la fisiología de plantas y animales para incrementar la producción de alimentos; las posibilidades de comunicación electrónica que borran fronteras políticas y han permitido superar barreras que los mismos grupos de poder tratan de imponer para privatizar el conocimiento y arrebatarse a los pueblos su patrimonio cultural. Indudablemente, el progreso de los seres humanos en lo físico merced al uso sistemático de su propio entendimiento es posible y puede constatarse mejor en los países ricos, los de la primera industrialización, pero los beneficios de cada uno de los avances se van atenuando conforme se recorre el espectro hacia la pobreza, hasta desaparecer en lugares como Haití o el Cuerno de África cuando no se convierten en generadores de grandes males medioambientales merced a la deforestación, el manejo irresponsable de los desechos químicos o la emisión de gases tóxicos a la atmósfera.

Peor aún, el progreso del Primer Mundo se ha sustentado desde la época de la expansión colonialista, no en aquel entendimiento de la Ilustración cuyo uso permitiría a los hombres y las mujeres llegar a la mayoría de edad sino en la razón instrumental –que bien podríamos llamar también lógica del mercado– de los intereses del capitalismo: en su nombre, a partir de la era de los grandes descubrimientos geográficos, los europeos pretendieron civilizar a los pueblos que, para su mal, encontraron en los territorios a los que llegaron; evangelizarlos imponiéndoles a sangre y fuego la aceptación dócil y acrítica de un sistema jerarquizado de poder; o someterlos a su protectorado para garantizar el saqueo de sus riquezas. Lejos de ser liberadora, esa razón instrumental se ha convertido en un aparato de control ideológico, de dominio y avasallamiento.

En cuanto al progreso mental y moral vaticinado por Condorcet, la lógica del mercado ha producido, en la entraña misma de los países ricos, millones de seres cuya mayor aspiración es el consumo y que, a despecho de las facilidades de información a su alcance, apenas se enteran de lo que ocurre alrededor y mucho menos se cuestionan si lo que hacen ellos mismos o sus gobiernos es o no correcto. En un tiempo tan lejano del nuestro como la década de los cincuenta del siglo pasado, el antropólogo estadounidense Loren Eiseley advertía respecto a sus connacionales:⁶

El hombre moderno está siendo arrastrado por una corriente de cosas generadoras de otras cosas con tal rapidez que no es posible hacerse de una ética sustancial ni de estabilidad interior alguna; de haberla, se trata de vestigios de un orden anterior que se atenúa día con día. Hemos vuelto a la naturaleza no como el pastor griego que, en la ladera, escuchase con alegría el retorno de Pan tocando la zampoña sino como un animal malvado y precoz que se arrastrase, en la oscuridad, hasta su cubil para esconder los poderes que ha robado. Los dioses, serenos e imperturbables, sabrían muy bien qué cabeza abatir con el rayo final.

⁶ Citado por R. Dubos, *op. cit.*, pp.14–15.

El progreso secularizado, el que sólo busca la siguiente invención y sustituye el uso del entendimiento por la consigna publicitaria, no es progreso de ningún género: es un espejismo en el desierto, un engaño en el que trastabillan y se tambalean las generaciones de los seres humanos.

Válidos como son estos cuestionamientos, no dejan de emparentar con los que sostienen aquí y allá grupos de oposición al sistema de explotación capitalista que rompen lanzas contra la Ilustración y el racionalismo en general. Incluso, pensadores críticos cuyo compromiso con los marginados y oprimidos está más allá de cualquier duda, suelen referirse a la Ilustración como fuente de males y vuelven con benevolencia los ojos hacia la irracionalidad, el esoterismo o la superstición y hacia aquellos valores que, en palabras de Kant, mantenían a los seres humanos en la minoría de edad porque implicaban que otros decidieran por ellos cómo pensar, a quién obedecer y cómo comportarse. En el conflicto entre quienes mandan y quieren mantener su poder y quienes ejecutan y aspiran a liberarse, esta confusión es un despropósito: si hay alguna esperanza –y más vale estar seguros de que la hay– es preciso enmendar el equívoco: la lógica del mercado y el racionalismo no sólo no son la misma cosa sino, en la actual circunstancia histórica, pares dialécticamente opuestos. De argumentar sobre tal conflicto trata este ensayo.

El uso de la razón como instrumento de conocimiento es un rasgo característico de nuestra especie; indudablemente, la capacidad de los seres humanos para reconocer indicios y deducir sus consecuencias, fue esencial para la sobrevivencia del hombre y la mujer primitivos; asimismo, es posible constatar que la aplicación sistemática de la razón –integrada en un cuerpo de conocimientos coherente mediante el cual se trataba de comprender y se transformaba el entorno– fue fundamental en la aparición de las primeras civilizaciones urbanas cuya emergencia en las riberas de los grandes ríos implicó un esfuerzo consciente de planeación agrícola e ingeniería hidráulica cuyo cúmulo de conocimientos empíricos sobre geometría, astronomía, agrimensura, etcétera, serían las raíces desde las cuales, en la Grecia clásica,⁷ crecerían la filosofía y la matemática, troncos y ramaje del que brotarían –lo mismo en el mundo antiguo que en el de nuestros días, desde la revolución científica de los siglos XVI y XVII– frutos magníficos del uso de la razón para comprender el mundo y, para bien o para mal, transformarlo.

EL ANTECEDENTE HELENÍSTICO

Asimismo, en el orbe helenístico,⁸ hasta la adopción del cristianismo como religión de estado (380 de n.e.) en el Imperio Romano, las aplicaciones de lo que los

⁷ Se llama “mundo clásico o helénico” al de los griegos en el lapso que va de la rebelión de los jonios contra el dominio de los persas hasta el inicio de la hegemonía macedonia (del siglo V al 338 a. de n.e.).

⁸ El “mundo helenístico o alejandrino” va de la muerte de Alejandro en (323 a. de n.e.) a la batalla de Accio (30 a. de n.e.) con la que se consolidaría el dominio romano en todo el Mediterráneo; empero, el culto de la razón, el desarrollo del conocimiento y sus aplicaciones tecnológicas, no desaparecieron de un día para otro y una revisión somera de filósofos, matemáticos e ingenieros importantes de la escuela alejandrina puede llegar, sin forzar las cosas, hasta los albores del siglo V de n.e.

estudiosos descubrían mediante la razón, dio lugar a una deslumbrante producción científica y tecnológica cuyos avances se perderían primero, por la incuria de los conquistadores romanos interesados sólo en los conocimientos de beneficio inmediato y, después, por la persecución –emprendida por grupos cristianos en los siglos IV y V– de cualquier manifestación de paganismo; en particular contra quienes cultivaban el amor al conocimiento porque éste podría contradecir a la Escritura.

Sin embargo, por naturaleza, el racionalismo es crítico; implica dudar por sistema y someter a juicio lo que se propone. Por esto, es incompatible con el dogma y, a lo largo de la historia, ha sido una fuerza irremediablemente en conflicto con el autoritarismo. Así, al declinar el mundo helenístico, primero por la dominación romana y luego por la imposición del cristianismo como religión de estado, el extraordinario desarrollo científico postalejandrino fue mermando hasta desaparecer, como se ha dicho, por la ignorancia de los conquistadores y el fanatismo de algunos obispos, supervisores de que la nueva fe dominante no se contaminara con el pensamiento pagano.

A la derrota de Alejandría en Accio, siguió el saqueo y la destrucción del patrimonio cultural helenístico, el secuestro de la gente culta para servir como esclavos en la metrópoli imperial, el desdén por el conocimiento y la filosofía; a pesar de que los romanos tendieron a imitar la cultura de los pueblos conquistados, especialmente la de los griegos, su ignorancia y su pragmatismo produjeron sólo una caricatura del modelo. Sobre estas bases, no es sorprendente que al iniciar la Edad Media, privasen la exaltación del irracionalismo, la superchería y vinieran los anatemas contra cualquiera que se atreviese a razonar según el modelo del racionalismo griego. Lucio Russo⁹ describe esta catástrofe cultural:

Al pasar el tiempo, los vientos del irracionalismo dominaron el clima de los que habían sido los grandes centros intelectuales helenísticos. Los conocimientos de química, contaminados de la magia y la religión, generaron la alquimia; la sabiduría astronómica menguó y se convirtió sólo en una jerga para hacer horóscopos. Así, mientras se extinguía la ciencia, la permanente tendencia humana hacia la superstición se expresaba por nuevos y fértiles canales y nunca desde entonces, la seudociencia –combinación de creencias irracionales expresadas en un lenguaje tomado de la ciencia pero privado de su metodología– ha cedido su supremacía al menos en lo que respecta a la atención popular.

Si bien Lucio reconoce que cumbres intelectuales del mundo romano como Plinio, Séneca y Vitruvio se empeñaron en acercarse a la ciencia y la filosofía helenística, sus esfuerzos distorsionaban aquel pensamiento porque no comprendían el método; incluso, como volvió a ocurrir más tarde, el culto de lo antiguo se perdió en lo esotérico; ello es el caso de las escuelas neopitagóricas cuya influencia persiste hoy en la superstición del hombre de la calle. Por cosas como ésta, Lucio concluye que “aun las amalgamas de sabiduría antigua con elementos científicos se deterioraron hasta que fueron destruidos todos los remanentes de la antigua cultura científica”. Significativamente, en 391 de n.e., al caer el crepúsculo con que

⁹ Véase Russo, *op. cit.*, en particular, el capítulo “The Decadence and End of Science”, pp.231–241.

iniciaría la Edad Media, la primera biblioteca pública de Alejandría, el Serapeo, fue demolida por el patriarca Teófilo y casi veinticinco años después, en 415, una turba azuzada por él mismo lapidó hasta la muerte a la filósofa y matemática Hypatia, “la última comentarista de obras científicas en Alejandría”.

Ese era el signo de los tiempos. Entendido así, ya no sorprende el anatema que Agustín, obispo de Hipona (354-430) y padre de la iglesia, lanzara contra los matemáticos a quienes acusaba de tener pacto con el diablo para confinar a los seres humanos en las mazmorras del infierno.¹⁰

Y, no obstante, al abordar la sorprendente tarea de tratar de conocer la naturaleza divina por medio de la razón, filósofos cristianos medievales como Duns Scoto, Guillermo de Ockham y Tomás de Aquino, siguiendo a Platón y Aristóteles, contribuyeron a que resurgiera la lógica como base del método deductivo para el descubrimiento de la verdad e influyeron los estudios teológicos y profanos (notables en geometría y mecánica) de importantes antecesores del Renacimiento.

EL RACIONALISMO MODERNO

Así como el racionalismo helenístico entró en conflicto con las tendencias dogmatizantes de su época, el del Renacimiento generó reacciones extraordinariamente violentas entre los defensores de la fe y de los privilegios de las clases dominantes que, como lo hemos sostenido, venían a ser los mismos con diferentes vestiduras; tanto los protestantes con Calvino y Lutero a la cabeza¹¹ como la iglesia católica condenaron a quienes irrumpían en el mundo del conocimiento atreviéndose a cuestionar la verdad revelada que era, al fin y al cabo, la fuente del poder político y económico que esos personajes compartían con los aristócratas.

Los adelantados de la nueva *Edad de la Razón* –Vesalio y Copérnico; Galileo y Descartes; Leibniz, Huygens y Euler– eran creyentes practicantes de su propia religión y, a despecho incluso de sus intenciones, al poner en marcha y conducir la revolución científica, sentaron las bases sobre las cuales poco a poco, cada vez más gente, cuestionaría la validez de lo que decían los ministros religiosos, pontificaba el Papa o enseñaban en los templos.

¹⁰ Citado por Morris Kline, véase *Mathematics a Cultural Approach* p. 1. Según Kline, Agustín habría dicho: “The good Christian should beware of mathematicians and all those who make empty prophecies. The danger already exists that the mathematicians have made covenant with the devil to darken the spirit and to confine man in the bonds of Hell”.

¹¹ La pretensión de eximir a los líderes de la Reforma y a las iglesias cristianas reformadas de la intolerancia es fácilmente refutable: por ejemplo, la iglesia calvinista de Ginebra juzga y ejecuta en la hoguera (octubre de 1553) al fisiólogo Miguel Servet por sus opiniones teológicas adversas al dogma de la Trinidad y el fanatismo de Lutero es equiparable con el de los más sádicos inquisidores españoles (confróntese, por ejemplo, el apartado “La posición de Lutero frente a la caza de brujas” en el artículo Wikipedia, donde se cita la “prédica del 6 de mayo de 1526” y se refieren el *Pequeño catecismo* luterano y el *Catecismo reformado de Heidelberg*). Igualmente falsa es la propaganda que pretende presentar a las iglesias protestantes como propiciadoras del conocimiento científico: por ejemplo, si en algún lugar se sostiene aún en nuestros días que la narración del génesis bíblico es literalmente cierta con la consiguiente inmutabilidad de las especies y la negación militante de la evolución biológica, es en países de tradición reformista como los Estados Unidos.

Para ellos, la existencia de Dios no estaba en duda pero, lejos de atribuirle el papel de gran conductor del universo, omnisciente de las acciones u omisiones de los seres humanos, sin cuya voluntad no podría moverse ni la más pequeña brizna de hierba, a Dios le correspondía, si acaso, haber puesto en marcha el cosmos y no le era dado modificar sus propias leyes. Sin que se supiera cómo, los seres humanos de mediados del XVI habían recuperado la confianza en sus propias capacidades para interrogar a y conseguir respuestas de la naturaleza; este empeño era una tarea asequible a la razón y –como ya lo habían experimentado en el mundo helenístico– también era posible transformar el mundo en beneficio de los seres humanos. Entonces, aunque los filósofos naturales que empezaron a ser llamados científicos por aquella época no se lo propusieran, la nueva visión del mundo implicó una dramática disminución de la importancia de Dios y trajo consigo una transformación de las conciencias que implicó cambios profundos en el comportamiento común y en las creencias de los seres humanos: por ejemplo, el personaje más temido de los primeros siglos de la Edad Moderna, el diablo –cuya persecución había provocado la quema de miles de mujeres acusadas de brujería por toda Europa¹²– perdió realce y la superstición y la ignorancia fueron identificadas y combatidas como fuente de males sociales generalizados. Así, el racionalismo ilustrado devino instrumento liberador, particularmente útil para enfrentar el oscurantismo y la charlatanería.

Por otro lado, en gran parte del mundo los avances de la ciencia mejoraron la calidad de vida de millones de seres humanos; permitieron acabar o reducir azotes como la viruela y la poliomielitis; disminuir la mortalidad infantil, aumentar la esperanza de vida y dar a las mujeres (y a sus parejas) la posibilidad de decidir cuántos hijos tener; posibilidad, por cierto, que vino a socavar más aún la autoridad de los ministros religiosos empeñados en controlar la intimidad de los creyentes.

Sin embargo, a pesar de los beneficios derivados del avance de la ciencia, al menos desde la segunda mitad del siglo pasado,¹³ como se expuso ya en la extensa introducción de este ensayo aquí y allá, entre tirios y troyanos o para decirlo de otro modo, desde posiciones ideológicas de derecha e izquierda, empezaron a surgir críticas a la Ilustración, el racionalismo y la ciencia.

Ya no sólo la jerarquía católica y los fundamentalistas protestantes condenaron proyectos científicos de vanguardia como la experimentación con fines terapéuticos con células madre sino que, por ejemplo, intelectuales críticos como Lewis Mumford o feministas radicales como Sandra Harding hallaron, respectivamen-

¹² Aunque no hubo lugar de Europa que se librara de la persecución y asesinato de decenas de miles de mujeres acusadas de brujería entre 1450 y 1750, el número de juicios y ejecuciones (30,000 de las 35,000 documentadas) es notablemente superior en Escandinavia (~1,700-2,000), las Islas Británicas y sus dominios norteamericanos (~1,500-2,000) y los residuos del Sacro Imperio Romano de nación germánica (~25,000-30,000) respecto de la Europa mediterránea (~2,000) y la Europa del Este (~2,000) (confróntese, el apartado “Executions statistics” del artículo *Witch-hunt* de la edición en inglés de la propia Wikipedia).

¹³ En particular como una reacción ante los horrores de la Segunda Guerra Mundial asociados a la consciente y sostenida relación entre la ciencia, la tecnología de guerra y el esfuerzo bélico de los países involucrados en ella.

te, un pecado en las aportaciones de Galileo y un “manual para la violación” en los *Principia Mathematica* de Isaac Newton.

En algunos círculos académicos, incluso, se expresan tendencias a identificar la Ilustración como la base de “la razón instrumental” con la que los poderosos oprimen a los condenados de la tierra y los avasallan. Desde esta perspectiva, las guerras de conquista de las potencias colonialistas –con su cauda de crímenes contra los pueblos, su identidad y su cultura– habrían sido una expresión política de la razón opresora; más aún si se toma en cuenta que la superioridad militar se sostenía y acrecentaba, precisamente, por la revolución científica y técnica de la modernidad europea. Esto ha implicado también –sobre todo a partir de los proyectos científico-tecnológico-militares sostenidos por los gobiernos de los países beligerantes integrados al esfuerzo por alzarse con la victoria desde la Segunda Guerra Mundial y adoptados después sistemáticamente durante la *guerra fría* y hasta nuestros días– la crítica a la responsabilidad individual de los científicos como cómplices o colaboradores dóciles en empresas cuyas mercancías significan destrucción y muerte.

Hemos discutido ya por qué se yerra al identificar el racionalismo con la lógica del mercado, pero vale la pena reflexionar en otro tipo de cuestionamientos que merecen mayor atención porque en el discurso de los abanderados de la razón instrumental capitalista, es común tratar de presentar sus acciones como resultantes de una planeación verdaderamente científica en donde destaca la inaplicabilidad de métodos útiles en el estudio de lo simple, a la comprensión de lo que no lo es.

En un esfuerzo por dilucidar la validez de este otro señalamiento y, dado el caso, para tratar de dilucidar qué nos sería dado hacer para superar aquello que la motiva, en lo que sigue se prosigue el recorrido histórico del racionalismo, con los vaivenes que han tenido lugar al confrontarse con distintas reacciones románticas irracionistas y se presentan ejemplos de cómo las crisis de transición entre racionalismo y romanticismo pueden representar ocasiones únicas para el avance de la ciencia, pero también se advierten peligros anejos a la reacción irracionista, el resurgimiento del pensamiento mágico y las supersticiones, como instrumentos para mantener en la ignorancia y bajo control a quienes menos tienen.

En particular, tal crítica tiene sentido en relación con el reduccionismo, uno de los caminos por los que la ciencia de nuestros días ha logrado notabilísimos avances pero que no alcanza para explicar aquello en donde el todo no es igual a la suma de las partes. Se argumenta en este ensayo la reciente aparición de las llamadas ciencias de la complejidad como alternativa y complemento al programa reduccionista y como una puesta al día del racionalismo, quizá el mejor intento intelectual de la humanidad para comprender nuestro entorno.

Se quiere mostrar a los lectores que el reduccionismo, de valor innegable en muchos avances de la ciencia, si se aplica de manera irreflexiva o, peor aún, malintencionada, aísla, divide y concentra el poder del conocimiento en pocas manos.

LA ILUSTRACIÓN

Luego de que la humanidad buscara durante miles de años explicaciones para todo en la voluntad divina, los pensadores del seiscientos deciden dejar a Dios en el fondo, convertirlo en parte del paisaje ideológico y volverse hacia sí mismos. Abrevando en las grandes corrientes del pensamiento griego, recuperan la confianza en su aptitud para comprender y transformar el mundo. Entre el descubrimiento galileano de las lunas de Júpiter y esa “vasta inteligencia” de Laplace –capaz de conocer el estado de todas las partículas del universo y, mediante las leyes de Newton, calcular su evolución presente, pasada y futura– hay doscientos años en los que crece la certeza de que el universo obedece leyes naturales y de que la razón, atributo máximo de nuestra especie, es capaz de descubrirlas y aprovecharlas en beneficio propio.

Esta certidumbre trastorna al mundo en todos sus aspectos; en fase con las aspiraciones de la burguesía emergente, pronta a tomarse el poder político sobre las ruinas de las instituciones feudales, el culto a la razón sustituye al de la divinidad e influye cada aspecto de la vida. Hechos a un lado los prejuicios teológicos y metafísicos de la Edad Media, todo el conocimiento habría de ser reconstruido sobre bases distintas.

Desde que se apagara la luz del racionalismo helénico y helenístico, las supersticiones habían hallado en la ignorancia su mejor caldo de cultivo y habían propiciado que el poder político, anclado y confundido con el de las jerarquías religiosas, avasallara a los individuos y los sometiera a los peores excesos: sobre la base del miedo generalizado a lo sobrenatural, mediante auténticos crímenes contra la humanidad, el aparato de poder había creado un estado de terror para someter a la gente.

La exaltación de la razón por encima de los dogmas y su implacable ejercicio crítico fueron un fermento subversivo cuya acción dio lugar a una revolución de las conciencias y produjo el racionalismo como doctrina filosófica y como actitud ante la vida; ambas se levantaron sobre tres principios explicativos generales:

1. El *materialista*: hay un mundo real, independiente de la percepción de los seres humanos; un mundo con cualidades esenciales, un universo que puede *reducirse*, en última instancia, a *materia*.
2. El *mecanicista*: todo lo que sucede ocurre merced a fuerzas que operan sobre los cuerpos y producen movimiento. El espacio y el tiempo son absolutos.
3. El *determinista*: dado el supuesto anterior, como la maquinaria no puede desobedecer las leyes que la rigen, todo en el universo está determinado, independientemente de si puede o no calcularse.

En su lucha contra el antiguo régimen, la burguesía se adueñó del discurso racionalista para minar las bases de la estructura feudal y, una vez en el poder, lo utilizó para perpetuarse en él exacerbando las consecuencias de sus principios generales (los defensores contemporáneos del sistema hegemónico de nuestros días

sólo han refinado los mismos argumentos): desde la interpretación espuria de los capitalistas, en la dinámica social las mercancías importan más que los seres humanos y el máximo valor es la ganancia; los flujos de dinero y las leyes del comercio determinan el destino de hombres y mujeres: los convierten en el vehículo mediante el cual las mercancías garantizan la producción de más mercancías. Así, la burguesía conservadora sustituye la voluntad de Dios por la ley de los mercados.

Como tantas veces en la historia, la clase revolucionaria impulsa primero el cambio, le da legitimidad y lo abandera; después, lo detiene y lo traiciona. De su programa original, purga las componentes revolucionarias, ahora subversivas, para luego evitar más cambios, echando mano de todo lo que esté a su alcance con tal de perpetuarse en el poder.

Así, el racionalismo, enajenado a su favor por los nuevos dueños del mundo, se aplicó entonces a postular normas para todo: desde el arte hasta la vida íntima de las personas; su potencia liberadora fue encauzada para evitar que pudiera servir como instrumento en contra del orden establecido, del mismo modo en que había contribuido a socavar la autoridad de la Iglesia y la monarquía.

La formación típica de un científico demanda, con frecuencia, dejar fuera cualquier preocupación ajena a los propios estudios; así, recibe un entrenamiento intenso mediante el cual aprende a investigar en su campo con la mayor eficiencia posible; su visión del mundo se restringe conforme acumula distinciones y grados académicos y, finalmente, llega a dominar su rama de especialización sin enterarse de otra cosa. Es así como mejor sirve al sistema.

Preguntemos ahora si éste es el camino correcto hacia la comprensión del mundo y preguntemos también, con más énfasis, si la pretensión de la ciencia reduccionista es correcta y debe seguirse su ejemplo al estudiar la realidad social y las distintas expresiones del espíritu humano. Desde nuestra perspectiva, y desde la de los físicos Goldenfeld y Kadanoff la respuesta es negativa:

Las ideas que constituyen los cimientos de nuestra visión del mundo son en verdad bastante simples: el mundo respeta las leyes y éstas rigen dondequiera. Todo es simple, diáfano y se puede expresar en términos matemáticos, ya sea mediante ecuaciones diferenciales parciales u ordinarias... Todo es simple y diáfano, excepto, desde luego, el mundo. (Goldenfeld y Kadanoff, 1999: 87)

¿Qué hacer entonces?

Queda claro que los intentos de interpretar los procesos humanos –desde la conciencia de los individuos hasta la historia o la evolución cultural de los pueblos– con la herramienta del reduccionismo mecanicista son un despropósito y empeñarse en defender su validez, una necedad. El porqué es simple: hasta el último tercio del siglo XX, la física se había construido con base en postulados simplificadoros sin posibilidad de analogías válidas en un mundo característicamente complejo.

LA MATEMÁTICA DEL MUNDO DEL MAÑANA

Para abordar la complejidad del mundo implícita en la cita de Goldenfeld y Kadanoff, disponemos de los avances de la física teórica contemporánea y de su herramienta, lenguaje y método: la matemática. Aquí es necesario despejar algunas dudas y aclarar una serie de confusiones muy difundidas acerca de la esencia de la misma.

Medir es una de las operaciones más primarias para relacionar la realidad física con el mundo de abstracciones que forman el universo matemático, pero restringir los alcances de esta ciencia a la búsqueda del rigor en las mediciones corresponde a la visión positivista baconiana según la cual sólo lo que puede registrarse empíricamente (i. e., medirse) puede conocerse.

Ni siquiera en el trabajo galileano medir tuvo tal importancia y cuando a Einstein se le preguntaba por “su laboratorio”, mostraba orgulloso la estilográfica en el bolsillo de la camisa: las grandes teorías de la ciencia se han construido sobre bases matemáticas, sí, pero eso no tiene que ver con la pretensión de exactitud en las mediciones sino con las posibilidades de plantear hipótesis sobre cómo ocurre algo en la naturaleza, deducir las consecuencias en el ámbito de los formalismos matemáticos y confrontar las consecuencias con lo que realmente sucede (en donde, posiblemente, el medir cobra importancia) para refutar o no las hipótesis. Esa es la gran lección de Galileo y hoy, como hace trescientos cincuenta años, sigue vigente:

Matematizar una disciplina es... penetrar los objetos de estudio con las herramientas para el pensamiento que nos da la matemática, es buscar en ellos lo esencial y acotar lo contingente, es aprender a reconocer las relaciones estructurales o dinámicas entre sus diversos elementos para deducir lo que no es evidente. (Gutiérrez, 1999: 93)

En efecto, la matemática no es una colección de técnicas para medir y contar; su éxito como lenguaje de la ciencia está directamente vinculado con su capacidad inagotable para descubrir pautas y estructuras en donde la observación directa y la estadística –justificadora de prácticamente cualquier cosa– sólo puede acumular datos. De hecho, la estadística es el opuesto metodológico de las grandes construcciones teóricas, en particular de los sistemas como instrumentos para conocer el mundo, en los que se hace un corte para considerar las cosas como separadas y para volver a presentarlas, ya no como cosas solamente sino como cosas interrelacionadas.

La exigencia de medir con exactitud es, indudablemente, importante en la tecnología pero, ni así, puede verse como un elemento del método de la ciencia (ni de la tradicional ni de la emergente). En cambio, es parte del discurso pseudorracionalista del aparato de poder: algunas verdades a medias, una pila de prejuicios y otra de intenciones políticas, han servido de base para querer cubrir de “cientificidad” afirmaciones insostenibles. No obstante, ese tipo de argumentaciones gozan de un reconocimiento social muy alto en algunos círculos científicos, sociedades y escuelas de la clase sacerdotal. Si un reporte de investigación no lleva pruebas de

chi cuadrada o regresiones múltiples, podrá ser devuelto por los árbitros con un lacónico comentario acerca de su falta de objetividad o, peor aún, descalificándolo por poco científico.

La sobrevaloración de los métodos estadísticos es útil en la conservación del poder, lo mismo en los comités que aprueban programas de investigación que en las esferas de la política de los estados: recurriendo a los “datos duros” de la macroeconomía, por ejemplo, los tecnócratas venden la idea de bonanza económica mientras la gente común se muere de hambre. Pero, insistimos, nada de esto tiene que ver con el papel de la matemática en la ciencia.

SOBRE LA CRISIS DEL PARADIGMA DOMINANTE

En la escala astronómica, el tiempo y el espacio newtonianos fueron relativizados por Einstein y, en la atómica, fue necesario inventar la mecánica cuántica, ese “acto de desesperación” de Planck, para explicar la radiación del cuerpo negro. Pero no por eso las leyes de Newton dejaron de ser leyes ni por ello se desmoronó la física clásica. Rige, como el monarca de *El Principito*, exactamente donde y como le corresponde hacerlo si bien, siguiendo con el símil, sus dominios alcancen sólo una parcela de la realidad.

Con convulsiones periódicas, la matemática ha avanzado a lo largo de dos mil quinientos años a base de coraje: los pitagóricos vieron cómo se venía abajo la ilusión mística de la conmensurabilidad de dos magnitudes cualesquiera; Herón de Alejandría y, siglos después, Girolamo Cardano, descubrieron un número cuyo cuadrado es menos uno (la raíz imaginaria pura); Galois probó que es imposible resolver por radicales la ecuación general de quinto grado; Pierre Laurent Wantzel y Ferdinand von Lindemann demostraron la imposibilidad de cuadrar el círculo, duplicar el cubo y trisectar el ángulo usando sólo regla y compás; Riemann y Lobatchevski construyeron geometrías que desafiaban la intuición alterando el quinto postulado de la geometría euclídea; Cantor probó que el infinito no es único sino que se puede formar una cadena infinita en la que el infinito de cada eslabón es más grande que el del anterior; Poincaré echó por tierra la ilusión de Laplace al descubrir que el determinismo de las leyes de Newton implica, bajo ciertas condiciones, una impredecibilidad esencial. . . cada ejemplo significó una crisis en el pensamiento matemático y, de cada una, la matemática salió fortalecida.

El teorema de Gödel merece ser considerado aparte: luego de casi un siglo de esfuerzos por establecer un conjunto de axiomas que le dieran a toda la matemática una base rigurosa, este matemático probó en 1931 que *en cualquier sistema lógico-formal, siempre hay una proposición indecidible, es decir, una proposición del sistema que no puede demostrarse a partir de los postulados iniciales*, de manera que no se puede garantizar que el mismo sistema no implique una contradicción.

Curiosamente, Gödel prueba su resultado dentro de un sistema formal y es válido porque el aparato lógico-matemático que lo sustenta es esencialmente robusto; no importa el oscuro recoveco de ese sistema en el cual se oculte el indecidible, el teorema es verdadero y porque lo es, el indecidible existe.

No hay una relación directa entre el teorema de Gödel y las capacidades de la matemática para comprender el mundo ni se deducen de él límites insalvables; de hecho, la ciencia ha crecido matematizándose y, en dos mil quinientos años de historia matemática, cada uno de sus grandes subsistemas –desde la geometría euclídea hasta la topología o la teoría de las probabilidades– ha sido construido sin haberse encontrado nunca una contradicción en el cuerpo axiomático y, si acaso se llegase a encontrar un indecidible, se puede siempre agregar al mismo cuerpo y la barrera, si acaso cabe llamarla así, se echa siempre más y más atrás. Por esto, como el *Libro de Arena* de Borges o la cadena de conjuntos de cardinalidad transfinita de Cantor, la matemática en sí misma es inagotable. Gödel encontró que no son imposibles las inconsistencias en los cuerpos axiomáticos, pero, al descubrir sus limitaciones, dio también una prueba de la grandeza de la matemática, no de su debilidad.

Cabe entonces preguntarse, si el instrumental matemático ha sido hasta hoy la mejor herramienta de la física, pero la extensión del método reduccionista –de utilidad innegable– es notoriamente insuficiente para comprender procesos de sistemas colectivos cuyas propiedades no pueden explicarse como el resultado de sumar comportamientos parciales, ¿hay una física y una matemática adecuadas para esta clase de sistemas? Las hay, se llaman *física de los sistemas complejos y matemática de los sistemas dinámicos no lineales*.

En efecto, frente la visión del mundo del mecanicismo reduccionista, estrechamente enfocado a una sola disciplina en alcances y aplicaciones, la visión de los sistemas complejos provee una teoría interdisciplinaria e integradora, cualitativa y dialéctica; capaz de trascender *el estudio de las partes* para convertirse en un aparato para estudiar *la integración de las partes* en la cual lo más importante es comprender las *propiedades emergentes* como resultado de la interacción, en un sistema de elementos relativamente simples, de un comportamiento colectivo diferente del que presentan por separado los elementos del sistema.

Y lo más importante es que, como la teoría de la relatividad, la física cuántica y el teorema de Gödel, esta nueva visión del mundo es también una consecuencia de lo que hemos llamado el “implacable ejercicio crítico” de la razón; en particular, es el resultado de una profunda aplicación de la matemática, uno de sus instrumentos más agudos. Así, el racionalismo sigue siendo el mejor instrumental que el ser humano ha construido para reflexionar sobre sí mismo y su entorno.

LA REACCIÓN

A finales del XVIII, el movimiento romántico encabezaría la reacción contra las tendencias uniformadoras del racionalismo neoclásico: del programa original de la revolución burguesa tomó la bandera de la libertad, exaltó al Yo y rechazó la posibilidad de explicar la naturaleza de manera única: sólo es posible que cada individuo la perciba intuitivamente y, en el intento por conocerla, prevalecen lo subjetivo, lo irracional y lo imaginativo. En la *Naturphilosophie*, Johann G. Fichte y Frederich von Schelling, entre otros, dan cuerpo a una teoría del conocimiento con-

sonante con aquellas tesis: a los postulados del materialismo oponen un principio de unidad entre naturaleza y espíritu humano; éste, libre y eterno, escapa al grosero determinismo mecanicista; es preciso estudiar sus manifestaciones superiores, lo subconsciente, lo sentimental y lo místico.

Desde entonces, y hasta el presente, la actitud ante la ciencia se ha movido entre distintas formas de racionalismo y romanticismo: desde la confianza o la veneración complacientes, en un extremo de las oscilaciones, al rechazo total y la añoranza por un pasado míticamente ubicado en una era anterior a la Edad de la Razón, en el otro. Se mueve aún entre el culto al sistema de producción científica y tecnológica sin contexto –es decir, sin ubicar sus tendencias hegemónicas como resultado de la dirección impuesta por el aparato del poder económico dominante de nuestros días– y las posiciones de no pocos intelectuales que, en su ataque ciego a la ciencia, han hecho que vuelva por sus fueros la creencia en lo sobrenatural, en supersticiones y mitos cuya difusión, caldo de cultivo de la ignorancia, sólo puede servir al mismo aparato. Triste es la dicotomía: *la razón ajena a las emociones contra el sentimiento resuelto en misticismo*.

El pensamiento occidental se ha desarrollado, quizá desde la Revolución Francesa, en medio de un conflicto entre las ciencias y las humanidades. Estamos convencidos de que, si lo que nos importa es la gente y no las mercancías, es necesario potenciar la capacidad creadora de los seres humanos sobre la enajenación del sistema en favor de la economía de mercado. Esto pasa por resolver aquel conflicto. Hoy, por vez primera, empiezan a tenderse puentes para superar las diferencias pero también es hoy cuando la crítica neurótica al racionalismo gana más adeptos.

Puede ser que nos haya tocado vivir una de esas etapas de cambio rápido en la historia de las ideas en las que todo puede suceder. Nuestra responsabilidad como intelectuales no puede ser más grande: debemos contribuir, desde ambas riberas, a la construcción de esos puentes. El primer paso para hacerlo es, desde luego, evitar las actitudes arrogantes e identificar nuestras limitaciones. Antes de discutir cómo hacerlo, para allegarnos elementos de juicio y poder deducir una estrategia adecuada, es preciso referirnos a nuestro contexto histórico y a las tendencias que, en el mundo de hoy, pueden contribuir u obstaculizar el intento.

EL MUNDO HOY: CAMBIO RÁPIDO, REVOLUCIÓN PERMANENTE Y OBSOLESCENCIA

En la última década del siglo XX el mundo experimentó cambios profundos asociados con el fin de la era geopolítica bipolar: la caída de la Unión Soviética y el desmoronamiento del llamado “bloque socialista” condujeron al dominio absoluto, sin contrapesos, de la escena política y económica mundial por parte de los Estados Unidos de América y su capitalismo salvaje.

El tránsito al mundo unipolar, lejos de aliviar las tensiones características de la *guerra fría*, trajo consigo relaciones aberrantes entre naciones, sociedades e individuos. El mundo se encuentra inmerso en una crisis generalizada y la metrópoli imperial hace de la guerra el método para resolver los conflictos. El terrorismo

no es sólo la acción desesperada de grupos extremistas minoritarios o fanáticos que desafían al poder constituido; es también, y con alcances destructivos muy superiores a los de su contraparte, la violencia sistemática contra pueblos enteros ejercida por los estados, como Israel y Estados Unidos, con el poder suficiente para hacerlo de manera impune.

Las personas viven bajo la presión sostenida de estar obligadas a ocuparse primero y casi exclusivamente por sobrevivir; por esto, la gente se encierra en sí misma y busca salidas individuales a sus problemas cotidianos. El trabajo enajenante despoja a grupos enormes de seres humanos de toda posibilidad de reflexión y educación intelectual; el desempleo, a su vez, las encadena a otra sumisión: la de la búsqueda cotidianamente incierta de los medios de sustento. Por ejemplo, en el Occidente pobre, la mujer sale de su casa al trabajo no por haberse liberado de la tradición opresiva que la confina al hogar y la somete al hombre, sino por la precariedad del ingreso familiar y la necesidad de asegurar su propia subsistencia y la de los suyos.

La sabiduría y el conocimiento son riqueza de otro tipo y, en relación con ella, se repite el patrón impuesto por el sistema en todo lo demás: "los que saben" son unos cuantos, los que tienen la posibilidad de beneficiarse del bien social que es la ciencia, son menos aún. La ignorancia cubre como un velo espeso a las mayorías a quienes les ha sido escamoteado el derecho a desarrollarse intelectualmente. El abismo es, generación tras generación, cada vez más profundo y no se vislumbra una solución pues, para empezar, ni siquiera existe conciencia del problema.

Los cambios políticos globales del último tercio del siglo XX tuvieron, sobre todo en los países del Tercer Mundo, contrapartes domésticas igualmente dramáticas. La formación universitaria, sobre todo la relacionada con las ciencias y las humanidades, perdió su valor. Hoy, muchos de quienes podrían ser profesores e investigadores deben, por menester, emplearse en trabajos ajenos a los de su orientación profesional y, cada vez más, los aparatos estatales prefieren importar conocimiento desde los grandes centros de producción científica y tecnológica del mundo a impulsar un desarrollo propio.

Esas aberraciones han provocado una disminución de la creatividad global en la sociedad y, notoriamente, de la libertad individual. Por una parte, los medios de comunicación masiva se arrojan el papel de educadores ante el abandono deliberado de las tareas educativas por parte de los estados del capitalismo, maduro o dependiente, y saturan el éter de entretenimiento banal y de violencia: los horrores de la guerra forman ya parte de la distracción de las familias en sus horas de descanso: impudicamente, los noticieros de la televisión y la radio los difunden y hace mucho tiempo que la gente empezó a creer que ése —el de las Torres Gemelas hechas polvo en Nueva York, el del Consejo de Seguridad de las Naciones Unidas doblegándose una y otra vez ante la locura belicista del gobierno estadounidense— es el estado normal de las cosas y que no pueden, por lo tanto, ser de otra manera.

¿DESALIENTO O ESPERANZA?

La desesperanza conduce a la búsqueda de soluciones personales inmediatas y por ello las mayorías se vuelcan hacia el misticismo y se refugian en la religión; reaparece el pensamiento mágico: la influencia de adivinos, predicadores y chamanes es cada vez mayor; ante la total indiferencia de las autoridades educativas y sanitarias, tienen acceso sin restricciones a los medios de comunicación y –dado el deterioro del sistema público de salud y lo inaccesible que es la atención médica privada para el pueblo– la gente les confía su salud física y emocional a todo tipo de charlatanes; asimismo, cree a pies juntillas sus pronósticos y orienta su vida según sus recomendaciones. Como una reacción ante los males que los aquejan –muchos de los cuales, en la imaginación popular, son fruto de la razón y la ciencia– los seres humanos de principios del tercer milenio, han vuelto a la superchería como solución última y confiable.

Y sin embargo, nunca en la historia hubo mayores posibilidades de acceder a la información y de educarse –usando los medios que la tecnología de las comunicaciones pone al alcance– que en nuestros días. Uno de los frentes de conflicto más agudo es el del control de esos medios: por un lado, se han convertido en las nuevas ruedas del comercio y la actividad financiera sobre las cuales el capitalismo medra e impone sus leyes; por otro, con ánimo académico o sin él, cualquier persona puede sumergirse en la Internet –si bien el que no todos tengan acceso es, hoy en día, un elemento más de las desigualdades que son raíz y fruto del capitalismo– y tener contacto con el conocimiento científico y el saber humanista de nuestros días: ahí se tiene acceso a bancos inmensos de datos y es posible ponerse al día en los avances de investigación de cualquier tema, confrontar tesis o ensayos, defender y difundir movimientos u opiniones sociales contrahegemónicos, etcétera.

El control de la información y del conocimiento es un instrumento de dominación pero también puede ser un elemento liberador si se actúa con ingenio y creatividad. En nuestros días, el cambio en todos los órdenes de la vida es más rápido que nunca: la sociedad capitalista tiene una altísima tasa de obsolescencia de la producción –piénsese, por ejemplo, en la vida útil de un programa para computadora– y la cantidad de información disponible crece exponencialmente día a día, mientras los nodos en la red electrónica mundial se multiplican con velocidad similar. Estos son indicios de inestabilidad estructural y sugieren un estado de crisis. Los nuestros son tiempos que ofrecen una coyuntura extraordinaria para cambiar. Ante la embestida por el control de la conciencia de la gente, se abre la posibilidad de aprovechar el cambio rápido e impulsar una suerte de revolución permanente. Esto requiere una estrategia adecuada para contrarrestar la obsolescencia y saber estar al día a pesar de la rapidez con la que el conocimiento “de punta” se va sustituyendo: de otro modo, el sistema dominante siempre tendrá la posibilidad de imponer la enajenación sobre la capacidad creadora.

A mediados de la década de los setenta del siglo pasado, el embriólogo británico Conrad Hal Waddington –uno de los científicos y filósofos de la ciencia más destacados de la época– sostenía que la tasa de obsolescencia era tan alta, que bas-

taba con que transcurrieran “unos cuantos años para que una parte considerable (superior al 60% en algunos campos) de la reserva de conocimientos de la mayoría de la gente perdiera su vigencia” y proponía las siguientes medidas educativas para atender el problema:

... Presumiblemente, la solución consiste en enseñar (a) principios generales que se hagan obsoletos sólo muy lentamente; (b) métodos de investigación que permitan encontrar rápida y correctamente, información factual actualizada para poner carne sobre aquellos huesos [los de los principios generales...] cuando sea necesario a fin de aplicar; (c) métodos de clasificación de la información que establezcan una jerarquización en categorías de manera que los asuntos importantes para un contexto particular, puedan destacarse rápidamente y (d) el inculcar el deseo de continuar autoeducándose luego de que el periodo de educación formal haya terminado... (Waddington, 1977: 36-37)

Poner en práctica una educación basada en estos principios, apoyados en las facilidades de acceso y procesamiento de la información de nuestros días, puede ser fundamental si queremos convertirnos en agentes de transformación del mundo; conscientes de nuestro papel como científicos o humanistas, capaces de defender, ejerciéndola, nuestra capacidad creadora.

LAS CULPAS

Empero, es preciso volver al conflicto entre ciencias y humanidades descrito arriba; en particular, importa deslindar la crítica neurótica de la ciencia de los cuestionamientos válidos. Conviene hacerlo porque aquella crítica es la base de la tendencia retrógrada que alimenta la vuelta a las supersticiones y el pensamiento mágico (ubicado aquí bajo el nombre genérico de corriente *new age*), prelude de la nueva Edad Media anticipada hace más de una década por Umberto Eco. Mayor importancia tiene el deslinde si se toma en cuenta el hecho de que muchos intelectuales progresistas, humanistas destacados y científicos comprometidos con la gente, se han dejado llevar por el espejismo de algunas corrientes, cercanas al postmodernismo y el relativismo cultural, de moda en las metrópolis y cuyas posiciones se inspiran en lo *new age* o, en el mejor de los casos, lo rondan de muy cerca.

El racionalismo y la ciencia están hoy en el banquillo de los acusados. Un poeta, notable por su actuación política, expresa su punto de vista de la siguiente manera:

La caída del comunismo se puede interpretar como una señal de que el pensamiento moderno –basado en la premisa de que el mundo es discernible objetivamente y que el conocimiento así adquirido es susceptible de generalización– ha caído en una crisis final. (Václav Havel, “El fin de la era moderna”, *The New York Times*, 1 de marzo de 1992)

En este enunciado se resume con claridad meridiana la confusión inmensa sobre la cual se basa la acusación: Havel es incapaz de distinguir el campo semántico de sus animadversiones políticas del correspondiente a una teoría del conocimiento. Identificar el comunismo con la burocracia soviética es un grosero disparate difundido hasta el cansancio por los medios de comunicación masiva: que Havel

lo repita es propio de su talante ideológico; pero es peor aún el intento de justificar así la tesis de que el mundo no es discernible objetivamente a partir de una premisa falsa y sin relación con lo que se quiere inferir de ella.

Desde luego que el Universo se puede discernir objetivamente y el conocimiento adquirido en ese empeño intelectual es susceptible de generalización. No otra cosa se ha hecho en la ciencia durante los cuatrocientos años de su existencia; negarlo es una muestra o de máxima ignorancia o de pésima intención. Nos preguntamos si Havel y quienes comparten su opinión podrían sostener lo que dicen cuando viajan en avión, cuando usan un dispositivo láser o cuando vacunan a sus hijos. El que este tipo de afirmaciones pueda tener foro es también responsabilidad del sistema que hizo de algunos científicos una clase sacerdotal. Pero la ciencia es un bien social –cada descubrimiento ha sido financiado indirectamente por el trabajo de la gente común, mal que le pese al poder financiero– y debe estar al alcance de todos. Cada esfuerzo por explicar lo que es la ciencia, su historia, métodos y problemas es benéfico para la sociedad, cada denuncia acerca de los peligros de la pseudociencia, un servicio a la civilización. Una sociedad de gente informada y crítica es una sociedad más libre y justa. La ignorancia, como en la larga noche medieval, sólo favorece a la dominación.

Pero sería una necedad cerrar los ojos ante críticas legítimas. No obstante, es fácil darse cuenta de que éstas se refieren a la responsabilidad social de los científicos o a la orientación incorrecta o perniciosa de su trabajo y no a la ciencia misma. Un ejemplo de la mayor importancia se da en relación con la tecnología guerrera.

Un recorrido por los numerosos conflictos bélicos del siglo XX es suficiente para convencernos de que entre los científicos, específicamente entre los que voluntariamente se han asociado a la industria militar, abundan criminales de guerra que están al mismo nivel que los condenados en Núremberg; criminales que han puesto a disposición de los mandos militares y políticos, instrumentos de devastación y muerte como el gas mostaza, el napalm, la bomba de hidrógeno, los misiles teledirigidos o las armas bacteriológicas, aparentemente, sin remordimientos ni crisis de conciencia.

No es difícil percatarse de que las tendencias hegemónicas empujan en un sentido opuesto al de la solución del conflicto entre científicos y humanistas y que la magnitud del problema demanda una acción concertada entre ambos como parte activa de la conciencia de la sociedad y de sus propios gremios. Se trata entonces de presentar un frente común y atreverse a tender puentes entre las culturas de ambos tipos y, conjuntamente, participar en la sociedad civil para contribuir a que el hombre y la mujer común puedan vivir una vida en la que sean dueños de su propio destino.

COMPLEJIDAD Y CAMBIO POSIBLE

Como científicos, queremos referirnos a las posibilidades que hoy se han abierto para empezar a tender esos puentes desde nuestra ribera. Sin duda, las oportunidades de hacerlo están directamente relacionadas con los cambios en la ciencia durante los últimos cuarenta años. Boaventura de Sousa Santos les atribuye el producir la sensación de que lo hecho desde el XVIII hasta mediados del siglo XX es “historia antigua” (De Sousa, 1992: 9) y de volver a poner en jaque –luego de las crisis producidas por la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad– nuestra “confianza epistemológica”:

Estamos abrumados por un sentimiento de pérdida irremediable, más extraña aún por nuestra incertidumbre respecto a a qué es exactamente lo que perdemos. A veces, hasta es posible preguntarnos si este sentido de pérdida no será sólo un temor que oscurece los más recientes avances de nuestra vida individual y colectiva y, de nuevo, siempre hay confusión respecto a qué exactamente se había ganado. (De Sousa, 1992: 11)

La desazón descrita por el sociólogo lusitano es legítima: la confianza en nuestras posibilidades de conocer el mundo estaba asentada en el dominio avasallador de la ciencia mecanicista que, como todo imperialismo, ocultaba sus defectos para dar la impresión de fortaleza. Sin embargo –una vez más, desde dentro de la propia ciencia y bajo el amparo de la razón– quienes crecieron como científicos en el estudio de los sistemas complejos reconocieron la incapacidad del reduccionismo mecanicista para comprender lo complejo.

Ya, en 1972, Phillip W. Anderson (Premio Nobel de Física en 1977) escribía:

La falacia principal en este tipo de pensamiento es que la hipótesis reduccionista no implica, en forma alguna, una [hipótesis] ‘construccionista’: la habilidad de reducir todo a leyes fundamentales simples no implica la habilidad de empezar desde esas leyes y reconstruir el universo. De hecho, entre más nos dicen los físicos de partículas respecto a la naturaleza de las leyes fundamentales, menos importancia parecen tener con respecto a los problemas reales del resto de la ciencia y mucha menos con respecto a los de la sociedad. (Anderson, 1972: 393)

En efecto, la visión mecanicista del mundo, consustancial al reduccionismo, es demasiado miope para comprender el comportamiento complejo de la materia: la emergencia de patrones geométricos, la aparición repentina de formas de funcionamiento coherente, el desarrollo y la evolución de esas formas, la autoorganización, etcétera. Estudiar esta realidad desde la perspectiva reduccionista es un despropósito y empeñarse en defender su validez, como ya lo hemos dicho, una necesidad.

Pero fue el desarrollo de la matemática aplicada el que provocaría un vuelco en la década de los setenta del siglo pasado; en cascada, sus consecuencias han ido configurando una nueva forma concebir la relación entre realidad, física y matemática: al explorar el camino inverso al reduccionismo, se descubrió que aun sistemas dinámicos extremadamente sencillos pueden dar lugar a comportamientos

complicados y explicar, con base en esto y en términos de principios primordiales simples, la aparición espontánea de características colectivas que no se hallan en los agentes individuales que actúan en los sistemas cuando estos se consideran por separado.

El estudio de los sistemas dinámicos no lineales ha dado lugar a conceptos y herramientas nuevos y a una terminología relacionada con sus propiedades. En particular, hoy se sabe que un sistema cuya evolución temporal está determinada por una dependencia funcional relativamente simple, puede presentar transiciones entre distintos estados y fluctuaciones en todas las escalas, y, no obstante su impredecibilidad intrínseca, es posible hallar regularidades en el comportamiento del sistema que lo distinguen, sin duda alguna, del azar.

Los sistemas complejos no se definen –una definición es una trampa a la riqueza conceptual y fenomenológica de estos– es mejor caracterizarlos por sus propiedades y, entre éstas, las más relevantes son la autoorganización en zona crítica, la frustración y las propiedades emergentes.

Desde hace décadas, los físicos aprendieron a reconocer que en los sistemas abiertos, en aquéllos que intercambian materia, energía o información con su entorno, ocurre el fenómeno de *autoorganización*, entendido como la capacidad de tales sistemas de dar lugar a estructuras y patrones de manera espontánea, en ausencia de control externo.

Hay muchos ejemplos de autoorganización en lo cotidiano, quizá uno de los mejores es el de la formación de las nubes. Una mente candorosa se podría preguntar por qué el vapor de agua en la atmósfera no tiende, por difusión, a una distribución homogénea y uniforme. No lo hace porque la máquina solar crea gradientes de temperatura y estos, a su vez, provocan la ruptura del estado homogéneo (*ruptura de simetría*) y la organización de las partículas de agua en las estructuras coherentes y discernibles que llamamos nubes. También hay ejemplos muy claros de autoorganización en sistemas sociales: los ciclos de actividad periódica en los hormigueros y termiteros suceden sin control o dirección centralizada; simplemente son el resultado de una acción colectiva inconcebible en un individuo (Miramontes y DeSouza, 1996). Los patrones espaciales que surgen de la autoorganización de los sistemas se llaman *emergentes* y no surgen como el resultado de algún programa o voluntad exógena.

La expresión *zona crítica* tiene un significado muy preciso en la termodinámica (Jensen, 1998) donde se usa asociada a los fenómenos de transición de fase o bifurcaciones. Cuando un sistema se encuentra en la zona crítica ocurren fenómenos extraordinarios: se dan estructuras espaciales y fluctuaciones temporales perfectamente discernibles y de todos los tamaños pero cuya distribución de magnitudes sigue leyes muy precisas, las llamadas leyes de potencias que, por plantearlo coloquialmente, nos dicen que los eventos pequeños ocurren con frecuencia, los medianos con regular abundancia y los enormes con rareza. Tal y como ocurre con los terremotos y con la distribución de la riqueza en el mundo de hoy. En la zona crítica, una pequeña perturbación sobre el sistema puede llegar a influir el comportamiento de todos sus componentes (se dice entonces que existen ahí correlaciones

de largo alcance). En pocas palabras, son sistemas cuyo grado de integración es tan elevado que lo que acontece en una parte del sistema no le es ajeno al resto (como en un organismo). En los sistemas físicos, para llegar a la zona crítica, es necesario controlar un parámetro. Por ejemplo, la temperatura, si se habla del diagrama de fases de algún compuesto.

La *autoorganización en zona crítica* es llegar a la zona crítica sin necesidad de afinar parámetros; es decir, sin controles exógenos. Este concepto es de importancia capital para intentar comprender los procesos que implican la acción colectiva de sistemas con un gran número de componentes o actores. La noción de autoorganización en zona crítica fue propuesta por Bak, Wiesenfeldt y Yeng (1987) y es, quizá, un concepto que, como las revoluciones copernicana y relativista, cambie profundamente nuestra manera de interpretar el mundo.

Por otra parte, en 1975, Gérard Toulouse propuso el término *frustración* (Toulouse, 1975). Su nombre no puede ser más elocuente: se dice que un sistema se encuentra *frustrado* si los agentes o partes que lo componen no pueden satisfacer simultáneamente todas las restricciones de la totalidad (para una definición precisa, ver D. L. Stein, 1980). Un ejemplo ayuda más que una serie de ecuaciones: en un sistema social, un cuerpo de leyes no puede satisfacer a todos los integrantes de la sociedad; lo que beneficia al banquero perjudica al ahorrador, lo que ayuda a una clase golpea a otra. Es imposible la satisfacción simultánea y total. La sociedad utópica tendría que encarar este hecho de manera de hacer rotativa la frustración entre todos los elementos sociales. La sociedad real resuelve el problema cargando de frustración siempre a los pobres, a las mujeres, a los indios o a minorías raciales o religiosas.

No hemos usado tecnicismos, nos interesa destacar la esencia de los conceptos y no su formalismo. Pero es necesario mencionar que el estudio de los sistemas complejos es una disciplina netamente matemática en la cual, como en la ciencia en general, es válido el uso de metáforas y analogías mientras se tenga conciencia de que todo se encuentra perfectamente sustentado.

Las consecuencias epistemológicas de los sistemas complejos son dramáticas y alcanzan las más diversas esferas del pensamiento. Existen sistemas cuyos agentes pueden ser de naturaleza muy diversa y, sin embargo, evolucionar de manera semejante. Dicho de otro modo: existen sistemas cuya base material microscópica es disímbola (átomos, moléculas, amibas, insectos, neuronas, computadoras, etc.) que, sin embargo, tienen manifestaciones macroscópicas semejantes (estructuras geométricas, redes, asociaciones, comportamientos colectivos, etcétera).

Esto permite definir clases de equivalencia dinámica mediante la identificación de todos los sistemas que tienen el mismo comportamiento macroscópico aunque su naturaleza microscópica sea distinta. De esta manera, la dimensión de las posibles manifestaciones de la naturaleza es relativamente pequeña porque, con base en leyes simples, es posible explicar multitud de comportamientos complejos.

El proceso de abstracción que permite identificar semejanzas entre muchas y muy variables cosas es uno de los principios organizadores sobre los cuales se construye el conocimiento; está en la base de las distintas representaciones del

mundo que los seres humanos han construido y nos ha permitido superar el pasmo ante la diversidad. Hasta muy recientemente, los intentos por aplicar este enfoque en las ciencias de la vida y el estudio de los procesos sociales habían fracasado o, calzados a fuerza, produjeron no sólo reservas sino animadversión de parte de los estudiosos de esos campos. El desarrollo de la teoría de sistemas dinámicos (cuyos cimientos fueron tendidos por Henri Poincaré a finales del siglo XIX) y el descubrimiento de grandes categorías de dinámicas universales, permite proponer una nueva concepción del mundo en la cual es posible descubrir, explicar y comprender el comportamiento de sistemas de muy diversa índole con las mismas herramientas matemáticas y el mismo aparato conceptual:

... puede ser una herramienta importante [para comprender] los fenómenos de evolución y revolución social, así como del papel activo y consciente del hombre como promotor de esos cambios; en ese sentido, los fenómenos de transición que se esbozan tanto a nivel físico como en el análisis de la evolución de la estructura de la ciencia, podrían estar presentes en todos los niveles. [...] Creemos que vale la pena añadir que [el entendimiento] de las leyes de evolución de la materia, a diversos niveles de los fenómenos de transición y amplificación de fluctuaciones, nos pueden ayudar a comprender la dinámica de los cambios sociales revolucionarios hacia una sociedad más justa, así como el papel del hombre como motor de estos cambios. (Cocho, 1975: 81–82)

Como se ve, hace casi treinta años se descubrió que el camino inverso al reduccionismo –la teoría de sistemas complejos– nos permite extender con una economía de medios semejante a la de la física tradicional, nuestra comprensión del mundo en muchas direcciones y abona la idea de que, por muy diversa que pueda ser la realidad, el conocimiento es uno solo y las distintas divisiones de la ciencia, imposturas.

En particular, la teoría de sistemas complejos contribuye a superar la antigua disputa entre lo que C. P. Snow llamó “las dos culturas” para referirse a la oposición entre ciencias y humanidades acentuada luego de las atroces aplicaciones de la física a la tecnología de guerra a mediados del siglo XX a las que nos hemos referido.

Por ahora, el pensamiento dominante entre quienes hacen la ciencia sigue siendo mayoritariamente reduccionista. Sin embargo, en las últimas tres décadas se ha confirmado que con las herramientas de los sistemas dinámicos no lineales es posible abordar y explicar aquellos problemas de formación de patrones en sistemas complejos descritos arriba, para los cuales la física tradicional es totalmente insuficiente.

En lo social, ya hemos visto cómo los cambios de nuestros días ocurren con una rapidez inimaginable hace cincuenta años. Esto, por sí mismo, no configura una situación revolucionaria, pero sí da oportunidades de que se generen crisis de distintos tamaños en las cuales una acción relativamente pequeña, ejecutada en el momento adecuado, puede provocar cambios importantes. Este es el tipo de situaciones en las cuales, dice el refrán chino, “una chispa puede incendiar toda la pradera”.

Desde el aparato de dominación, es claro que la contraparte hará esfuerzos por impedir aquellas acciones que, montadas en la cresta de las fluctuaciones, puedan dar lugar a un cambio en las cualidades del sistema. Todo es conflicto, como lo estableció Heráclito hace veinticinco siglos y es merced a la lucha que todo se resuelve: en zona crítica, la sociedad civil puede romper las barreras que el sistema le impone; en tal situación, los seres humanos se vuelven agentes de su propia historia, dueños de su destino y pueden dejar de ser juguetes, más o menos inconscientes, de los grupos de poder y de las fuerzas del mercado. Temporalmente, al menos, pueden conducir la revolución permanente.

CONCLUSIÓN

Estamos seguros de que el racionalismo sigue siendo el fermento subversivo que fue durante la Ilustración, mal que les pese a quienes se adueñaron de su discurso para someter a los demás. Si nos empeñamos en construir un futuro digno, mal haríamos en renunciar a uno de nuestros mejores instrumentos para hacerlo. Lo que hace falta es fortalecer la componente humanista del quehacer científico; hacer una ciencia rigurosa pero emocionalmente comprometida con la gente, capaz de dejar de ser patrimonio y sirviente de unos cuantos para convertirse en catalizador de una vida digna y, así, contribuir a la felicidad de los seres humanos.

En las formaciones sociales dominantes de nuestros días, la capacidad creadora y el potencial liberador de la ciencia no alcanza ya a la mayoría de la población porque las clases dominantes la han enajenado para sí y la han depositado en un reducido grupo de iniciados. En cambio, el sistema promueve la difusión en los medios de programas insustanciales de "contenido científico" para el público en general; con ello apuntala al discurso científico como parte de su soporte ideológico, pero la superficialidad de la información produce en la gente o una aceptación acrítica de las bondades de ese discurso o un rechazo suspicaz y muchas veces bien fundamentado.

Frente a esto, la reacción de más de un grupo progresista ha sido, paradójicamente, reaccionaria: la satanización de la ciencia y una "vuelta al pasado" en la que se confunden tendencias críticas válidas y propuestas retrógradas que, a despecho de las intenciones de quienes las sostienen, se convierten en las mejores colaboradoras del aparato dominante.

La atmósfera intelectual de nuestro tiempo se ha dejado arrastrar por la marea de la nueva derecha que proliferó después de la caída de la Unión Soviética. El desánimo se ha materializado con la aceptación de dicotomías que imponen los que dominan el mundo ("... están conmigo o en mi contra").

Estamos obligados a rechazar la elección entre la ciencia cómplice del poder y el humanismo confundido con lo *new age*.

La labor de la gente progresista honesta no es únicamente tratar de satisfacer las necesidades básicas de los seres humanos para evitar que la búsqueda imperiosa por sobrevivir nos esclavice y nos ponga al servicio del sistema o de tratar de resolver las necesidades biológicas como el alimento, el techo, la salud y la segu-

ridad. También, se trata de ejercer el derecho de todos y de todas a la creatividad como suprema manifestación del espíritu humano.

En ese sentido, es preciso aprovechar la dinámica compleja del cambio social en nuestro tiempo y tender los puentes necesarios entre la ciencia y el humanismo porque, como hemos tratado de establecer en este ensayo, la separación de ambos campos no sólo es artificial sino esencialmente errónea y engañosa. Construyamos los puentes para educarnos en una nueva cultura: aprendamos a ser científicos conscientes de nuestra responsabilidad social y hagamos de la práctica de la ciencia una forma de ser humanistas. En sentido opuesto, transfórmese el desencanto de los humanistas en combate a la crítica neurótica de la ciencia y recupérese la confianza en la capacidad racional de la humanidad para transformar su historia. Desde ambas riberas, es preciso recuperar la esperanza.

BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, Phillip W. (1972), "More is different", *Science* 177 (4047): 393–396.
- Cocho Gil, Germinal (1975), "Algunos aspectos de la termodinámica de la vida", en *El origen de la vida: Symposium conmemorativo en homenaje a A. I. Oparin*. México: UNAM.
- De Sousa Santos, Boaventura (1992), "A Discourse on the Sciences", en *Review*, Vol. xv-1: 9–47.
- Dubos, René (1961), *The Dreams of Reason. Science and Utopias*. Nueva York: Columbia University Press.
- Goldenfeld, N. y Kadanoff, L. (1999), "Simple Lessons from Complexity", *Science* 284: 87–89.
- Gutiérrez Sánchez, José Luis (1999), "Teorías, sistemas y comprensión del mundo", en Ramírez, S. (coord.), *Perspectivas en las teorías de sistemas*. México: CEIICH-UNAM / Siglo XXI, pp.93–100.
- Jensen, Henrik Jeldtoft (1998), *Self-Organized Criticality*. Cambridge University Press.
- Kant, Immanuel (2004), *¿Qué es la Ilustración?* (Edición de Roberto Aramayo). Madrid: Alianza Editorial, Filosofía.
- Kline, Morris (1962), *Mathematics. A Cultural Approach*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Miramontes, Octavio y DeSouza, Og (1996), "The Nonlinear Dynamics of Survival and Social Facilitation in Termites", *Journal of Theoretical Biology* 181, (4): 373–380.
- Russo, Lucio (2009), *The Forgotten Revolution. How Science Was Born in 300 BC and Why it Had to Be Reborn*. Berlín: Springer-Verlag.
- Stein, Daniel L. (1980), "Disordered systems", en Stein, D. L. (ed.), *Lectures in the Sciences of Complexity*. Nueva York: Addison-Wesley.
- Toulouse, Gérard (1977), "Theory of the frustration effect in spin glasses: I", *Commun. Phys.* 2: 115
- Waddington, Conrad Hal (1977), *Tools for Thought. How to Understand and Apply the Latest Scientific Techniques of Problem Solving*. Nueva York: Basic Books, Inc. Publishers.
- http://en.wikipedia.org/wiki/Witch-hunt#Execution_statistics [consultada el 21 de enero de 2013].
- http://es.wikipedia.org/wiki/Caza_de_brujas Revisar especialmente la sección "La posición de Lutero frente a la caza de brujas" [consultada el 21 de enero de 2013].

PATRONES Y PROCESOS EN LA NATURALEZA. LA IMPORTANCIA DE LOS PROTECTORADOS *

*Nada existe, sólo átomos y vacío.
Todo lo demás son pareceres.
Demócrito de Abdera*

DE manera recurrente los científicos, en especial los físicos, han creído haber llegado a la frontera del conocimiento, a los límites del saber, y también de cuando en cuando han anunciado, como lo hizo Demócrito hace veinticinco siglos, que se ha llegado al fondo del pozo del conocimiento. En algunos medios de la física contemporánea la ecuación de Schrödinger es considerada como la herramienta capaz de describir cuanto ocurre en el universo (no relativista), y no es exagerado decir que tal afirmación es algo así como la *teoría de casi todo*. Sin embargo, aunque esta ecuación es correcta y bastante útil (su validez ha sido comprobada cotejando sus resultados para casos especiales con experimentos finísimos) no se puede resolver cuando el número de partículas llega a la docena. Entonces no tiene sentido tratar de resolver dicha ecuación para conglomerados grandes de átomos y ni soñar que se pudiese hacerlo para biomoléculas o algo más grande. Por lo tanto, resulta que la *ecuación de casi todo* es la *ecuación de casi nada*, puesto que no es capaz de decir algo acerca de las células, los organismos, los terremotos, los arcoiris, las sociedades ni de todo lo que parece ser interesante en escalas espaciales que no sean las submicroscópicas.

Tal parece que la naturaleza –como los enconados dioses de la mitología griega, que castigan al hambriento Tántalo alejando el alimento y la bebida cuando éste ya los tiene casi a su alcance– hace retroceder sus fronteras cuando en apariencia están próximas y siempre queda algo más por descubrir, lejos de nuestro alcance.

En 1972, Philip W. Anderson, Premio Nobel de Física, publicó un artículo en el cual llama la atención acerca de la futilidad de perseguir las leyes de lo fundamental, entendidas éstas como las leyes de lo más pequeño: “La capacidad de reducir todo a leyes fundamentales simples no garantiza la capacidad de reconstruir el universo a partir de esas leyes”. El trabajo de Anderson es uno de los banderazos de salida hacia la búsqueda de otras leyes, de aquellas que surgen de la organización de la materia y que no se pueden deducir a partir de las de sus componentes.

* Ensayo escrito por Pedro Miramontes y Germinal Cocho. Publicado en la revista *Ciencias*, núm. 59, julio-septiembre de 2000, pp.12-20.

Llama la atención que el afán en la búsqueda de los límites últimos mediante la reducción de los sistemas al estudio de sus partes se extiende también a otras ciencias, notablemente a la biología molecular. La complejidad del mundo vivo ha llevado a sus estudiosos a adoptar la estrategia que privilegia el estudio de las partes en perjuicio de la totalidad. No es que este enfoque sea indebido; de hecho, ha demostrado su poder en la biología molecular y en la biotecnología (lo mismo que la física lo ha hecho en la mecánica cuántica), pero es en la ciencia de la vida en donde la observación de Anderson tiene un impacto mayor. En efecto, lo que en física ha sido la reducción de fenómenos al estudio de las partículas elementales, en la biología lo ha sido a los genes. Como muestra podemos citar la expresión eufórica de Walter Gilbert (Premio Nobel de Química en 1980) acerca de la perspectiva de que la genética molecular cuente con el genoma humano completo (la lista ordenada de todas las bases nitrogenadas –A, C, G y T– que forman el ADN): “La secuenciación completa del ser humano es el grial de la genética humana. Toda la información posible acerca de la estructura humana será revelada –aunque no comprendida”.

Podemos notar que a veinticinco siglos de distancia la afirmación de Gilbert es equivalente a la de Demócrito. Anderson nos previene que el camino inverso a la reducción no garantiza la extrapolación de los resultados de un nivel de organización de la materia a los niveles superiores de organización de la misma. A nosotros nos parece evidente que el solo conocimiento de todos los genes del ser humano no permitirá comprender gran cosa de las funciones del mismo. La imaginación, los sueños, las sonrisas y el amor no podrán ser entendidos a partir del conocimiento de todos los genes, de la misma manera que la ecuación de Schrödinger no sirve para entender a tales genes.

NO HAGAS NADA SIN PROTECCIÓN

En 1952, Arthur C. Clarke, muy conocido por ser el creador del relato que dio lugar a la famosa película de Stanley Kubrick, *2001 Odisea en el espacio*, escribió en 1953 un cuento de tintes ominosos. Se trata de “Dial F for Frankenstein”. En él, Clarke se imagina a nuestro planeta en el futuro hipotético de 1973, en el cual las redes de telecomunicaciones conectan prácticamente a todas las poblaciones sobre el planeta. En un momento dado, las autoridades internacionales ponen en funcionamiento un nuevo satélite de comunicaciones como culminación de la red mundial, y en la medianoche del día en el que la conexión se establece todos los teléfonos del mundo repican al unísono. Quienes descuelgan el aparato no escuchan más que un lamento tenebroso de ultratumba: es el llanto de un recién nacido que no es humano; es la red mundial que nace como una inteligencia superior, que adquiere conciencia de sí misma y desarrolla pensamiento, ideas y sentimientos. El relato finaliza con la perdición de la humanidad.

Clarke se inspiró con seguridad en el sistema nervioso central. Aunque nadie sabe bien a bien de dónde salen las ideas, sentimientos, inteligencia y conciencia humanas, una idea muy generalizada, y posiblemente cierta, es que están distri-

buidas en todas partes y en ningún lado. Desde la Edad Media se sabe que el cerebro humano es el asiento de las facultades mentales (lo mismo sucede en muchos otros animales; los perros, por ejemplo, sueñan, tienen conciencia de su existencia y algunos rasgos innegables de inteligencia y sentimientos), pero fue hasta los principios del siglo XX cuando Santiago Ramón y Cajal estableció que la neurona es la unidad estructural básica del sistema nervioso central. Entonces, una colección de procesadores biológicos –las neuronas– interconectados, procesando e intercambiando información deben, de alguna manera, dar lugar a las funciones superiores del sistema nervioso central. Lo destacable del cuento de Clarke es haber señalado la posibilidad (en claro contraste con el programa científico reduccionista) de que estas funciones –imaginación, sentimientos, fantasías, etcétera– sean una consecuencia del *proceso de interacción* de los agentes que componen un sistema y no de la *naturaleza material* de los mismos.

También existe un relato angustioso de Boris y Arkadi Strogardski, un par de hermanos soviéticos que escribieron en las décadas de los sesenta y setenta algunas de las páginas más brillantes de la ciencia ficción como auténtico género literario. En su relato, una conciencia habita el interior de una caja llena de procesadores en paralelo y no sabe que no tiene cuerpo. Su creador le ha dotado de una memoria de un pasado inexistente pero factible y le ha convencido que es parapléjico y ciego. Él piensa que su sentido del oído son los impulsos eléctricos que le llegan a través de un micrófono conectado con el exterior. Es sobrecogedor. ¿Fantasía? ¿Pura imaginación? Veamos.

Todos somos testigos de que la turbulencia de algunos líquidos es independiente de la naturaleza material de los mismos, y que, sin embargo, sus manifestaciones son similares, muy parecidas o, de plano, las mismas: tanto el agua como la gasolina y el alcohol, por ejemplo, forman ondas, vórtices y remolinos esencialmente de la misma manera. De forma análoga, una computadora posee la capacidad de cómputo independientemente de que su CPU sea de microprocesadores de silicio, de transistores de germanio, de bulbos incandescentes o de engranes metálicos y palancas; en principio cualquier dispositivo, digital o analógico, que sirva como compuerta lógica puede ser la base de una computadora.

Al igual que la turbulencia, la propiedad de cómputo es independiente de la naturaleza material de los agentes procesadores. En estos casos se dice que la turbulencia y el cómputo son propiedades *protegidas* de la materia, propiedades que no están codificadas en los componentes materiales (el bulbo no tiene implícito que va a ser usado para computar y no para reconstruir imágenes en una televisión; el alcohol no tiene un código que le preestablezca que va a terminar como un daiquirí en una fiesta o en la herida de un paciente).

En los protectorados, la conducta macroscópica se asocia con propiedades emergentes que no dependen de la naturaleza microscópica del sistema.

Es una fortuna que existan los protectorados, pues de otra manera para entender el comportamiento de un sistema macro o mesoscópico habría que describir minuciosamente el comportamiento de cada uno de sus componentes. Por suerte, como lo mencionan Goldenfeld y Kadanoff en un bello ensayo de reciente apari-

ción: “de otro modo, para modelar un *bulldozer* ¡necesitaríamos modelar los quarks que lo forman!”

La materia se autoorganiza en niveles y escalas bien separados y distinguibles; por ejemplo, una escala de organización es la de los quarks, otra lo es la de los hadrones (neutrones y protones) y otra la de los átomos. No hay una organización en escalas intermedias. Es gracias a la existencia de estas escalas en los niveles de organización de la materia que la física misma existe; no podemos imaginarnos la ciencia tal como la conocemos si para estudiar cualquier cosa tuviéramos que ir a lo infinitamente pequeño de sus componentes. Si deseamos estudiar un litro de gas, la presión es una propiedad que no depende de si el gas es argón, nitrógeno o metano. Lo que sucede es que al elegir una escala para estudiar un fenómeno las interacciones subyacentes se promedian y no se manifiestan individualmente como tales, sino como un campo de fondo. La moraleja es que hay que elegir el nivel adecuado de descripción y análisis para entender un fenómeno: no tiene sentido resolver la ecuación de Schrödinger para estudiar por qué se funde un foco.

La física y la biología son ciencias de escalas, y no únicamente en la jerarquía de la organización de la materia sino también con respecto al espacio y al tiempo: la predicción climática es prácticamente imposible de una semana a la otra, pero las estaciones se suceden a lo largo de los años con gran parsimonia; un huracán es una estructura de hermosa regularidad cuando se fotografía desde un satélite; pero una paloma atrapada en medio de uno de ellos no piensa lo mismo. Como lo señala Octavio Miramontes, una hormiga tiene un comportamiento irregular y desordenado mientras que el colectivo de hormigas es una organización coherente y armónica.

El fondo del asunto es el estudio de las causas que hacen que existan los protectorados, ¿por qué la materia se organiza espontáneamente para dar lugar a toda una jerarquía de organización? ¿Por qué existe, por ejemplo, la superfluides del helio (un estado que adopta cuando se enfría por debajo de la temperatura crítica de -270°C) si en los quarks no está preestablecido que deba de existir? ¿Por qué existen la imaginación y la fantasía humanas si en los genes no está escrito? La respuesta a estas interrogantes puede, a su vez, depender de otra cuestión. Sabemos que todos los electrones son idénticos entre sí, pues no hay manera de distinguir uno de otro; sin embargo, los átomos ya son distinguibles y se agrupan en cerca de una centena de tipos distintos (pero idénticos entre sí), diferenciados por sus propiedades, que se resumen en la tabla de Mendeléiev.

Si seguimos escalando la ladera de las escalas de organización y, con ello, los diversos niveles de complejidad, llegamos a la situación en la que cada animal, en particular los humanos, es distinto a todos los demás, cada uno es un *individuo* –Paco es diferente de Ernesto–. Por una parte, la complejidad aumenta y, por la otra, correlativamente, la semejanza se pierde. Así, la complejidad es el origen de la individualidad pero, paradójicamente, se manifiesta únicamente bajo acciones colectivas. Aunque más que *paradójicamente*, deberíamos decir *dialécticamente*. Sin embargo, en estos tiempos de neoliberalismo en lo económico y de enajenación en lo educativo y cultural, dialéctica es una palabra que pasó de ser maldita durante

la *guerra fría* a inexistente en nuestro mundo orweliano que ha encontrado en la televisión a su *big brother*.

UN PAR DE EJEMPLOS

El concepto de protectorado es sumamente importante, ya que sin él no se comprende la organización de la materia que da lugar a estructuras discernibles y funcionales, por ello creemos importante agregar un par de ejemplos. La figura 1 contiene tres imágenes, una de bacterias *Bacillus subtilis*, otra es el crecimiento dendrítico de iones de zinc y la última es una fotografía de un amanecer sobre la cordillera de los Himalayas tomada desde un satélite; los tres patrones son idénticos, ya que poseen la misma caracterización matemática cualitativa (son fractales), y también lo son desde el punto de vista cuantitativo, pues tienen la misma dimensión fractal. Este ejemplo es rico en enseñanzas, ya que nos encontramos ante un mismo patrón de crecimiento macroscópico con mecanismos microscópicos tremendamente distintos. Eso, para empezar, es un buen ejemplo de protectorado, pues involucra tanto un caso extraído de la biología, otro de la física y un modelo matemático. Dicho sea de paso, si no hubiera protectorados no existirían los modelos matemáticos, puesto que para construirlos tenemos que postular algunos supuestos o premisas que desdeñan la naturaleza íntima de los objetos a modelar. Pensemos en la situación en la que nos encontraríamos si para modelar la dinámica de una población o de una comunidad ecológica el color de los ojos de los individuos que componen los sistemas fuera relevante. Por otra parte, nos queda claro que en la organización espacial de las colonias de *Dicty* (como se le conoce a *Dictyostelium*) la contribución de los genes es irrelevante.¹

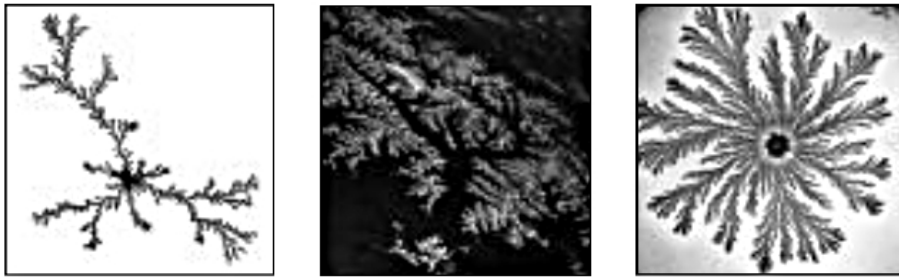


Figura 1

Nuestro último ejemplo, y confesamos que lo dejamos al final pues nos parece el más impresionante, es el tipo de protectorado que se puede estudiar en un cristal. Todos sabemos que un cristal es un sólido cuyos átomos se encuentran en una disposición espacial regular y simétrica. Gracias a esta uniformidad, en un cristal

¹ Una opinión contraria a la nuestra se encuentra en el artículo "The Development of Social Amoeba", de R. H. Kessin y M. M. van Lookeren Campagne, en el número de noviembre-diciembre de 1992 de la revista *American Scientist*.

hace falta únicamente conocer una unidad geométrica elemental para reconstruir el cristal completo mediante su repetición monótona. En un cristal a muy baja temperatura se pueden desdeñar las oscilaciones de sus átomos y lo que queda es una malla regular estática. A esa situación le llamaremos “cristal congelado” o “cristal muerto”.

A menudo los cristales tienen defectos que pueden ser puntuales (un átomo faltante, un átomo extraño...) o bien dislocaciones de borde (la interrupción de un plano del cristal y a continuación la liga entre el plano vecino superior con el inferior). Estos defectos tienen características de partículas, pues se pueden mover e interactuar teniendo como escenario al cristal, que cada vez parece más “vivo”. Lo interesante en verdad es notar que estos aspectos de los cristales tienen su contraparte tanto en el mundo de lo ultramicroscópico como a niveles cosmológicos. La teoría de las supercuerdas nos dice que, a niveles de la escala de Planck (10^{-33} centímetros), las partículas elementales no son entes puntuales sino cuerdas unidimensionales cuyos distintos modos de vibración dan lugar a todas las partículas, incluyendo a una que es la unidad cuántica de la gravitación (que no se ha encontrado aún, pues los aceleradores de partículas más poderosos en existencia únicamente tienen un poder de resolución de 10^{-17} centímetros). Estas cuerdas se propagan e interactúan de la misma manera que lo hacen los defectos en los cristales. A escala cosmológica, en el límite de lo muy grande, el espacio puede presentar defectos topológicos como las cuerdas cósmicas: largas hebras o lazos de masa y energía que surgen de transiciones de fase en el universo temprano y se comportan de un modo análogo a las dislocaciones en los cristales. Se tienen, asimismo, defectos puntuales, como los monopolos magnéticos y bidimensionales, como las “paredes cósmicas”.

Vemos pues cómo los aspectos importantes de multitud de fenómenos no dependen, o dependen poco, de los detalles particulares de la materia involucrada, por lo que pueden presentarse dinámicas similares en situaciones que son drásticamente diferentes, como sucede en el vacío en la teoría cuántica del campo, los defectos en los cristales o las vastedades del universo.

ALGO SE HA ROTO...

Al proceso mencionado dos secciones arriba, aquél en el cual la homogeneidad del conjunto de elementos de un sistema se pierde, se le llama *ruptura de simetría*, de manera que se puede decir que se gana complejidad si se pierde simetría. Aquí también caen bien ejemplos tanto de la biología como de la física. Uno de ellos es el desarrollo embrionario de los animales: un óvulo fecundado da lugar a dos células idénticas, y éstas, a su vez, dan lugar a cuatro, luego a ocho, dieciséis, treinta y dos y así hasta tener una estructura multicelular esférica (que es el sólido más simétrico de cuantos conocemos); de repente, llegado un momento en el desarrollo, del cual nadie sabe el porqué, la simetría esférica se rompe y el conglomerado celular pasa a un estadio de menor simetría que es la bilateral. Lo interesante del asunto es que este rompimiento de simetría geométrico va acompañado de un rompimiento

de simetría funcional: cada célula era idéntica a las demás antes de esta ruptura y luego pasa a ser una célula diferenciada, o, en otras palabras, con estructura y función distintas, algunas serán células hepáticas, otras se convertirán en neuronas, etcétera. Las rupturas de simetría en el desarrollo ontogénico del individuo van acompañadas de un incremento en la complejidad. Sucede lo mismo en el desarrollo filogenético, es decir, a lo largo de la evolución de las especies. Esta afirmación puede enfermar de un coraje a Stephen Jay Gould, quien ha hecho de su vida una cruzada personal en contra de la idea de que a lo largo de la evolución los seres vivos han ganado complejidad. Lo sentimos mucho, aunque no dejamos de mencionar su lucha contra las corrientes religiosas estadounidenses que pretenden que la teoría de la evolución no sea enseñada en las escuelas, así como su labor educativa, y su incesante crítica al racismo, al sexismo y a toda forma de discriminación.

Las rupturas de simetría son importantes pues dan lugar a estructuras discernibles donde antes existían estados homogéneos. Otro ejemplo de ruptura de simetría, sin recurrir a ninguna figura o gráfica, lo constituye el siguiente ejercicio mental. Imaginen un aro metálico (también se pueden hacer dibujos) suspendido del techo mediante una varilla vertical que es una extensión de uno de sus diámetros, de tal manera que el aro puede dar vueltas teniendo como eje de giro la línea vertical definida por ese diámetro y la varilla. En el aro se encuentra insertado un pequeño anillo metálico que puede deslizarse sin fricción a lo largo del aro. Si el aro y el anillo se encuentran en reposo, la posición de equilibrio de este último es el fondo del aro. Si lo alejamos de esta posición y lo soltamos, el anillo oscilará periódicamente alrededor del punto de equilibrio. Ahora pongamos el aro a girar; primero lentamente y después incrementando la velocidad de rotación. ¿Qué sucede con el anillo que se encuentra oscilando? Sucede que la fuerza centrífuga de la rotación del aro hace que cada vez le sea más difícil al anillo regresar hacia la posición de equilibrio, pero una vez que lo ha pasado se aleja de él rápidamente. No cuesta trabajo aceptar que al sobrepasar una cierta velocidad crítica de giro el anillo no vuelve más al fondo del aro rotatorio y comienza a oscilar alrededor de un punto que se encuentra en una de las dos mitades del aro grande. El punto de equilibrio original estaba colocado justamente en la parte más baja del aro sobre el eje de rotación que también es un eje de simetría; al incrementar la velocidad de giro la simetría se rompe y el nuevo punto de equilibrio queda en una de las dos mitades del aro, mitad que, por cierto, no se puede determinar de antemano. Aquí se ve que las rupturas de simetría no únicamente rompen la homogeneidad de un medio, sino que también eligen *mano* en donde antes había isometría: el sistema se volverá zurdo o diestro pero ya no seguirá siendo simétrico, tal como nos sucede a nosotros, que tenemos una simetría geométrica bilateral pero funcionalmente somos diestros o zurdos.

Existen muchos compuestos químicos que tienen propiedades físicas o químicas distintas dependiendo si los contemplamos en el espejo; estructuralmente son simétricos pero sus propiedades rompen la simetría funcional; dicha propiedad se llama *quiralidad*.

Hay rupturas de simetría en todas partes: los aminoácidos que forman nues-

tras proteínas son levógiros, esto es, son ópticamente activos y cambian hacia la izquierda el plano de polarización de la luz.

AUTOORGANIZACIÓN

Diez microsegundos después del big-bang, hará unos quince mil millones de años, el plasma de quarks y gluones que constituía esa fase incipiente del universo conocido se expandió y, al enfriarse, dio lugar a la formación de los hadrones y leptones, la dilatación posterior del universo enfrió tanto a la materia que los mismos se agruparon para formar átomos. Mucho tiempo después, en los hornos estelares, los átomos ligeros dieron lugar a los más pesados. En toda esta historia se repite el mismo patrón: los ingredientes de los niveles inferiores se agrupan, sin que en su naturaleza se encuentre explícita esa orden, para dar lugar a los integrantes de los niveles superiores. Adicionalmente, no se forman todas las estructuras que uno puede imaginar: sólo hay noventa y cinco tipos de átomos naturales, todos ellos cocinados con los mismos ingredientes. A este proceso espontáneo de organización de elementos individuales en estructuras coherentes lo llamamos *autoorganización*.

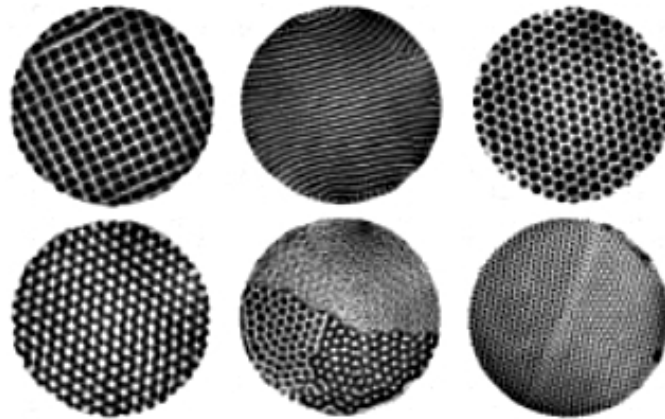


Figura 2

El fenómeno de autoorganización se conoce desde hace mucho tiempo, y se sabe que ciertos sistemas termodinámicos fuera del equilibrio muestran una capacidad espontánea para desarrollar estructuras, formas y patrones en un rango estrecho de sus parámetros como resultado únicamente de sus dinámicas internas. En la figura 2 presentamos los resultados de un experimento con fluidos granulares (arena). El profesor Harry Swinney, del Centro de Dinámica No Lineal de la Universidad de Texas, puso arena en un plato de Petri y lo colocó sobre una bocina conectada a un generador de audio en el cual podía modular la intensidad y la frecuencia del sonido, mismo que se traducía en vibraciones del plato con la arena. Después de homogeneizar perfectamente el contenido del plato, empezó a ensa-

yar diversas combinaciones de amplitud y frecuencia y obtuvo los patrones que se ven en la figura. Patrones por demás discernibles y coherentes que ni son el estado inicial homogéneo ni tampoco arena distribuida al azar. Reconocemos aquí un caso de ruptura de simetría de los mencionados en la sección anterior que se traduce en una *emergencia de patrones*, pero lo destacable es que las formas espaciales surgen espontáneamente de *la nada*. Ésta es la esencia del fenómeno de autoorganización (la autoorganización sólo es posible en sistemas termodinámicos abiertos bajo dinámicas no lineales, es decir, que intercambian masa, energía o información con su entorno).

Dicho sea de paso, el experimento de Swinney también es un caso de protectorado, ya que los mismo patrones ocurren si la arena es fina, gruesa, metálica, granos de mostaza o líquidos como mercurio o agua.

Un sistema evoluciona al transcurrir el tiempo y tiene varias posibilidades como destinos finales. A estos destinos se les llama *atractores*. El fondo de una vasija que contiene una canica es un *atractor puntual*; los atractores pueden ser *periódicos* –una órbita planetaria– o una serie muy complicada de estados que se recorren irregularmente pero que poseen geometría fractal bien determinada y que son conocidos como atractores *caóticos* o atractores *extraños*. El conjunto de estados iniciales que desembocan eventualmente en un atractor se llama *cuenca de atracción*. En este contexto, la autoorganización es un fenómeno que tiende a un atractor bajo la sola influencia de su dinámica interna.

ZONA CRÍTICA

La figura 3 representa un diagrama de fases de una sustancia pura. En ella podemos reconocer algunos aspectos de la vida cotidiana. Notemos que los ejes coordenados representan, respectivamente, la temperatura y la presión de la sustancia. Supongamos por un momento, sin menoscabo de la generalidad, que nuestra sustancia es agua.

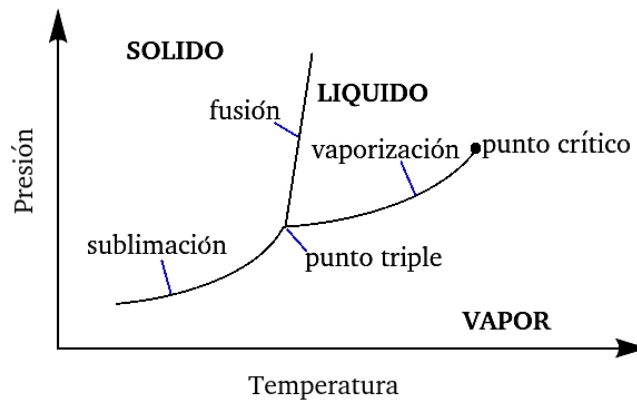


Figura 3

El primer hecho notable que salta a la vista es la existencia de un punto triple en los valores de presión y temperatura donde las tres curvas se encuentran, ahí coexisten las tres fases del agua: la sólida, la líquida y la gaseosa; es un estado difícil de creer pero real. Todos sabemos por experiencia que si cruzamos, aumentando la temperatura, la curva que sirve de frontera entre las fases líquida y gaseosa, el agua se convierte en vapor sin estados intermedios. Cambios análogos e igual de familiares se llevan a cabo al cruzar cualquiera de las otras curvas en cualquier sentido. Sin embargo, la intuición pierde terreno cuando notamos que la curva que separa la fase líquida de la gaseosa se *termina en un extremo*. Esto quiere decir que si manipulamos con habilidad las variables temperatura y presión podremos pasar de agua líquida a vapor de manera continua, sin una transición abrupta. Ese extremo de la curva se llama *punto crítico*, y sus propiedades son notables y se heredan a toda una vecindad a su alrededor, *llamada zona crítica*.

En la zona crítica la función de correlación tiene valores altos aún para distancias muy grandes. En lenguaje llano, esto quiere decir que tal sistema llega a tal grado de integración que todas sus partes se influyen entre sí, a un nivel tal de existencia colectiva que lo que afecta a uno de sus componentes lo resienten los demás. Otra de las características de la zona crítica es que los sistemas que se encuentran en ella experimentan fluctuaciones de todos los tamaños dentro de un rango relativamente amplio y que estas fluctuaciones se dan a un bajo o nulo costo energético.

Un ejemplo de esto son los polímeros biológicos. A la temperatura ambiente y en solución acuosa, la dinámica de las proteínas y ácidos nucleicos se lleva a cabo de tal modo que la contribución energética de la entropía casi cancela la de la entalpía, situación que constituye una condición característica que define una zona crítica de las mencionadas en la sección anterior. Consecuentemente, dicha dinámica puede llevar a cabo fluctuaciones a muy bajo costo energético, proporcionándole a las proteínas y ácidos nucleicos una gran plasticidad y facilidad de asociación y disociación. Cabe mencionar dos puntos: en primer lugar, si esto no fuera así, el costo energético del metabolismo sería imposible de obtener a partir de los alimentos y, segundo, los diferentes sistemas en zona crítica tienen propiedades genéricas similares que vale la pena explorar.

EVOLUCIÓN, ESTABILIDAD, CONFLICTO

Los seres vivos muestran una cierta permanencia o estabilidad en lapsos cortos (una coneja siempre tiene conejos) y cambio o evolución en tiempos largos. El cambio mutacional lento del material genético es un factor fundamental tanto para la permanencia o constancia del desarrollo embriológico como para el cambio fenotípico a largo plazo. Pensemos por un momento en el espacio o universo de todas las posibles variantes mutacionales de un organismo dado; este espacio imaginario es esencialmente infinito. Si la manera en que la evolución actúa fuese mediante la búsqueda aleatoria y exhaustiva (a la Darwin) sobre todo el espacio de posibilidades (*espacio fase*), la adaptación evolutiva sería esencialmente imposible,

pues la probabilidad de llegar a una adaptación útil en un tiempo finito sería esencialmente nula (la misma probabilidad de que un ejército de monos produzca *La divina comedia* tecleando al azar). La evolución biológica es un sistema dinámico que se desarrolla sobre el mencionado espacio de todas las posibles realizaciones genéticas y es evidente que deben existir algunos mecanismos que limiten el espacio fase en donde ocurre la exploración de modo que lo *imaginable* se separe de lo *viable*. En otras palabras, que la parte del espacio fase que se explore sea la zona con el potencial de acomodarse o integrarse fácilmente a las estructuras y procesos del desarrollo morfogénico ya existente. Un ejemplo burdo: si los delfines sufrieran una presión evolutiva dada, y la exploración del espacio fase tuviese que contemplar la posibilidad de transformarse en cucarachas, este camino sería un desperdicio, pues una cucaracha no puede alcanzarse a partir de las características de desarrollo morfológico que ya poseen los delfines.

También a nivel del funcionamiento metabólico de los individuos se hacen necesarios los mecanismos de restricción del espacio de posibilidades, uno de ellos es la reducción de la dimensionalidad del espacio físico en el cual se dan los procesos bioquímicos. Por ejemplo, los procesos celulares de replicación del ADN (duplicación de la molécula para dar lugar a dos juegos para las sendas células hijas después de la bipartición celular) y de transcripción genética (copiado del ADN en un molde de ARN) son procesos prácticamente unidimensionales. Si éstos se llevaran a cabo sobre una superficie o en el espacio de tres dimensiones, la probabilidad de síntesis con la precisión y a la velocidad requerida es prácticamente cero. El tránsito del ARN a través del ribosoma durante la síntesis de proteínas también es un proceso unidimensional, como lo son la mayoría de las reacciones bioquímicas asistidas por enzimas catalizadoras. Esta reducción de la dimensionalidad simplifica drásticamente la dinámica bioquímica.

En otras palabras, es necesaria la presencia de restricciones tipo “protectorado” que garanticen la permanencia o preservación de los procesos del desarrollo embriológico en medio de la dinámica del proceso evolutivo.

La reducción de la dimensionalidad del espacio fase actúa en una gran variedad de fenómenos de la biología; por ejemplo, el promedio de vida, la frecuencia cardíaca, la duración de la gestación, la tasa metabólica y muchos otros rasgos de los organismos varían como una potencia fraccionaria de la masa corporal; de hecho, la potencia es siempre un múltiplo de $1/4$. Este fenómeno se encuentra asociado a la estructura y distribución fractal de los sistemas respiratorio y circulatorio, lo que permite alimentar los tejidos de la misma manera, ya sea la masa corporal de un ratón o la de un elefante.

Un sistema, vivo o inerte, que se encuentre en zona crítica y que la alcance mediante un proceso de autoorganización, a diferencia de aquellos que, como el agua, necesitan el ajuste de un parámetro externo para hacerlo (como la temperatura o la presión), se llama sistema con *criticalidad autoorganizada*. La criticalidad autoorganizada tiene propiedades sorprendentes, una de ellas es que presenta rasgos propios del caos determinístico, notablemente la existencia de atractores extraños. Un atractor es el subconjunto del espacio fase, del espacio de posibles estados de

un sistema dinámico, hacia el cual los estados migran de manera natural. Los atractores extraños tienen una dimensión geométrica (de hecho, tienen una dimensión fraccionaria o fractal) menor que la del espacio de todas las posibilidades. De nuevo estamos ante la presencia de otra reducción de la dimensionalidad. Si la vida, como parece ser, se encuentra en la zona crítica, entonces es la dinámica natural del propio sistema la que impone que los seres vivos que existen no sean todos los imaginables, sino sólo aquellos que sean viables bajo las leyes de la fisicoquímica subyacentes a los procesos vivos.

Todo lo hasta aquí presentado sugiere que la naturaleza, en lo que a la biología se refiere, no es un artífice inteligente y genial, sujeto a sus propias leyes, que dispone de un número infinito de posibilidades para realizar obras de arte biológicas casi perfectas y de una diversidad rayana en el barroquismo. Más bien es un artesano que dispone de un número limitado de herramientas y métodos, sujeto a muchas restricciones y que, obediente de las leyes naturales (afirmamos que no hay una separación real entre las leyes del mundo vivo y las del inerte; tan sólo hay leyes naturales), resuelve los problemas que se le presentan como buenamente puede.

Quizá la presencia de tales limitaciones haga que la vida sea más fácil de estudiar de lo que pareciera a primera vista. Una de las razones del éxito del programa reduccionista en la biología ha sido la aparente e incomprensible complejidad del mundo vivo (lo que ha llevado a generaciones de biólogos a consolarse en el análisis estadístico de los datos de campo y laboratorio, estrategia que ordena y describe pero que no explica). Lo que aquí hemos expuesto muestra que la intrincada madeja tiene, después de todo, un cabo suelto. Para poder tirar del extremo y desenredar la madeja el pensamiento biológico teórico jugará un papel relevante.

Para cerrar este ensayo recordemos al más grande y primer biólogo teórico, el visionario zoólogo escocés D'Arcy Wentworth Thompson, quien escribió en la introducción de su majestuosa obra *On Growth and Form*: "La morfología no es sólo el estudio de las cosas materiales y de las formas de las cosas materiales sino que tiene un aspecto dinámico bajo el cual se toma en cuenta, en términos de fuerzas, las acciones de la energía. Y aquí bien vale la pena mencionar que, enfrentados con los hechos de la embriología o de los fenómenos de la herencia, el lenguaje comúnmente usado por los libros parece darle demasiada importancia a los elementos *materiales* presentes como si ellos fueran las causas del desarrollo de la variación o de la transmisión hereditaria. La materia por sí sola no produce nada, no cambia nada, no hace nada".

En otras palabras, si bien la materia es importante, pues sin ella no hay universo, desempeña solamente el papel de sustrato de lo verdaderamente trascendente que son los *procesos*. Partículas, genes o individuos no son suficientes para explicar la urdimbre de las acciones colectivas. Es como saber que Romeo y Julieta vivieron y murieron en Verona y no tener idea de la maravillosa trama que fue su transcurrir sobre la Tierra.

ESPACIO, MOVIMIENTO Y CAMBIO EN LAS CIENCIAS Y LAS ARTES *

VIVIMOS en una época de crisis, de cambios rápidos e inesperados, en que por un lado aumenta la riqueza en el mundo, pero por otro la distribución es cada vez más injusta. Dentro de este cambio rápido hay una tendencia a que se borren las fronteras entre diversas ciencias y entre los diversos medios de expresión artística, así como entre ciencias naturales y sociales, y entre ambas y las humanidades y las artes. Esta tendencia a la desaparición de barreras contribuye a que los seres humanos tengan una idea más clara de la dinámica mundial y puedan ayudar al tránsito hacia una sociedad más justa y creativa que la actual.

Esperamos que este trabajo, en el cual se discuten aspectos del espacio y del tiempo desde diversos ángulos, contribuya a una síntesis de las ciencias, las humanidades y las artes.

ESPACIO Y TIEMPO EN LA FÍSICA CONTEMPORÁNEA

Durante casi veinte años he ocupado mi tiempo de investigación como un feliz biólogo reduccionista, creyendo que mi investigación cuidadosa podría a la larga revelar verdades definitivas. Entonces empecé a leer libros sobre la nueva física. La experiencia fue demoledora.

Como biólogo suponía que los físicos eran hombres y mujeres fríos y poco emocionales que observaban la naturaleza desde un punto de vista cínico y cerebral, gente que reducía una puesta de Sol a longitudes de onda y a frecuencias y observadores que desmenuzaban la complejidad del Universo en elementos rígidos y formales.

Estaba totalmente equivocado. Empecé a estudiar los trabajos de personas con apellidos legendarios: Einstein, Bohr, Schrödinger y Dirac. Descubrí que no eran hombres cerebrales, sino personas poéticas y religiosas capaces de imaginar tales inmensidades que a su lado lo que antes he llamado “paranormal” era algo casi vulgar.

[Kit Pedlar (1927–1981), patólogo, escritor y productor de televisión.]

EL ESPACIO Y EL TIEMPO EN LA VIDA DIARIA Y EN LA FÍSICA CLÁSICA

Si contemplamos el mundo con su riqueza y variedad, en movimiento y cambio constante, más que pensar en un espacio absoluto, en una nada, pensamos en las

* Ensayo escrito por Marisol Cocho y Germinal Cocho. Publicado en: Valencia García, G. y M. E. Olivera (coords.), 2005. *Tiempo y espacio: miradas múltiples*. México: CEIICH-UNAM / Plaza y Valdés.

formas variadas en que se encuentran frente a nosotros. Éstas, en general, ni estarán en reposo ni serán algo inmutable; serán objetos o animales que cambian de lugar o se transforman con el tiempo; objetos inanimados que decaen o seres vivos que cambian de estado interno y envejecen.

Aunque la presencia de relojes favorece la idea de un tiempo absoluto que transcurre y fluye con velocidad constante, sentimos que la velocidad de flujo puede depender de diversos factores, y en particular de factores psicológicos,

Podemos decir que lo anterior es la concepción dominante espacio-temporal del sentido común, que difiere de la visión del espacio y el tiempo en la física clásica, pero que, como veremos, es coherente con aspectos importantes de la visión de la física contemporánea y con planteamientos de las artes plásticas.

En la mecánica clásica se plantea la presencia de un espacio abstracto tridimensional, vacío, en que los cuerpos en ausencia de fuerzas que perturben su movimiento se mueven sin cambiar su dirección ni su velocidad. Se trata pues de un espacio plano, *euclidiano*, en que las trayectorias naturales son líneas rectas y en que dos trayectorias paralelas no se encuentran nunca a distancia finita. Se concibe el tiempo como algo que fluye de modo imperturbable y uniforme con "velocidad" constante. Este flujo temporal es independiente del espacio y de las características de la dinámica de los cuerpos.

Sin embargo, tanto en el arte como en la física contemporánea y en las ciencias de la complejidad, el espacio y el tiempo tienen un "espesor"; se interrelacionan espacio, tiempo y materia, y el vacío adquiere una gran riqueza. Escuelas pictóricas como el cubismo tratan de captar en dos dimensiones mucha de esa riqueza, o dada la complejidad que se presenta tratan de captar rasgos sencillos de los procesos de movimiento y cambio, sin olvidar los aspectos volitivos y psicológicos.

En este trabajo uno de los autores (Germinal Cocho) presentará principalmente lo referente a la concepción de espacio y tiempo en la física contemporánea, mientras que Marisol Cocho se referirá principalmente a su visión como artista plástica. Sin embargo, creemos que se trata de aspectos complementarios de una visión del mundo que compartimos en gran parte.

EINSTEIN, LA RELATIVIDAD ESPECIAL, LAS GEOMETRÍAS NO EUCLIDIANAS Y LAS FUERZAS GRAVITACIONALES

Desde los tiempos de los griegos hasta mediados del siglo XIX se consideró que el espacio es plano y que por un punto sólo se puede trazar una paralela a una recta dada. Por ese punto sólo se tendrá una recta que no se encuentre con la otra a distancias finitas. Dado que muchos de los teoremas matemáticos sobre esta geometría "plana" se deben a Euclides, se denomina a esta geometría *euclidiana*. En esta geometría la suma de los tres ángulos de un triángulo es de 180° .

A mediados del siglo XIX, asociado a matemáticos como Gauss, Lobachevskii y Riemann se desarrollan las geometrías no euclidianas en que por un punto puede no pasar ninguna paralela o pasar un número infinito de ellas y en que la suma de los tres ángulos de un triángulo puede ser mayor o menor a 180° .

Lobachevskii consideró la posibilidad de medir ángulos en escala astronómica, viendo si la suma de los tres ángulos de un triángulo formado por una estrella fija y dos puntos de la órbita de la Tierra difería de 180° . El resultado resultó negativo, dentro del error experimental. Por otro lado, Riemann propone que en lo infinitamente pequeño la geometría podría cambiar, asociada a las fuerzas en lo microscópico. Sólo sesenta años más tarde, con la relatividad general de Einstein, se relacionará la geometría del espacio con las fuerzas y en particular con las fuerzas gravitacionales.

A finales del siglo XIX y principios del XX, en el que en los experimentos la velocidad de propagación de la luz sea siempre la misma, llevó a Einstein a formular la teoría especial de la relatividad, en que se interrelacionan espacio y tiempo, y en que las longitudes se encogen y los relojes se atrasan al aumentar la velocidad del marco de referencia. Además, la teoría implica que la masa efectiva de los cuerpos aumenta con su velocidad y que se puede transformar en energía. Vemos pues que con la relatividad especial, espacio y tiempo se vuelven interdependientes, aunque siguen siendo independientes de la materia.

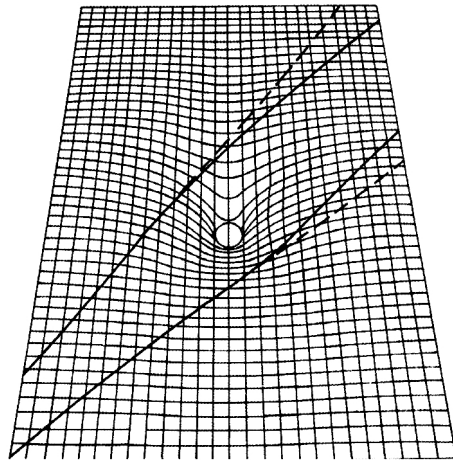


Figura 1: Un cuerpo de gran masa, como el Sol, curva el espacio. Los rayos de luz se desvían y no siguen una trayectoria rectilínea al viajar por el espacio curvo cercano al Sol.

Einstein, en una serie de trabajos, en los años de 1915 a 1917, presenta su teoría general de la relatividad, su visión revolucionaria de las fuerzas gravitacionales. Según la relatividad general, el espacio-tiempo no es plano sino curvo, con la curvatura dependiendo de las masas presentes. En este espacio curvo los cuerpos se moverían libremente sin estar sometidos a ninguna fuerza adicional. Las trayectorias curvas de los planetas se deberían a que se mueven en un espacio curvo y no a la presencia de ninguna fuerza adicional (véase fig. 1).

El vacío cuántico

Hemos visto que en la relatividad especial espacio y tiempo se interrelacionan, y que en la relatividad general, la teoría de la gravitación de Einstein, el espacio-tiempo es curvo, con la curvatura dependiendo de las masas presentes. En ambos casos el espacio-tiempo es continuo. Sin embargo, en la física cuántica el espacio puede ser considerado algo discontinuo.

En la física cuántica, el vacío, lo que quedaría si quitamos tanto la materia como la luz, es algo muy diferente a una “nada”; es un hervidero de partículas que aparecen, y después de un cierto tiempo desaparecen. El origen de este fenómeno es el principio de incertidumbre, durante un tiempo corto se puede violar la conservación de la energía y crear partículas de la nada. El tiempo de vida de estas partículas creadas es inversamente proporcional a su masa. Podemos expresar este principio de incertidumbre por la relación:

$$\Delta E \Delta t \propto h$$

donde ΔE es el valor de la violación de la conservación de la energía, Δt es el tiempo durante el cual esta violación puede tener lugar y h es la constante de Planck.

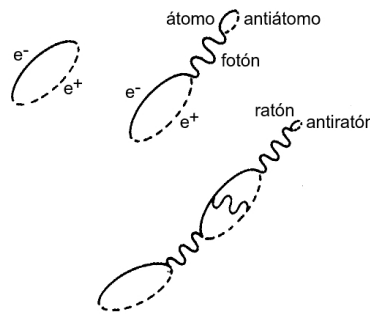


Figura 2: En el vacío cuántico se crean espontáneamente pares virtuales de partículas y antipartículas que pueden interactuar y aniquilarse después de un tiempo inversamente proporcional a su masa. Se muestran las parejas electrón-antielectrón, átomo-antiátomo y ratón-antiratón.

Como lo creado debe tener carga nula y otras propiedades de la nada, estas partículas se crean en pares; junto con un electrón, con carga negativa, se crea un antielectrón (positrón) con carga positiva. Después de un tiempo corto, electrón y positrón se aniquilan. En principio se crearían átomos y antiátomos y ratones y antirratones, que “vivirían” un tiempo muy, muy corto (véase la fig. 2).

El positrón, creado con el correspondiente electrón, puede aniquilarse con otro electrón que esté presente mientras el electrón del par creado sigue desplazándose. Esto se verá como si el electrón hubiese zigzagueado y si esto se repite el electrón seguiría una trayectoria fractal (véase la fig. 3).

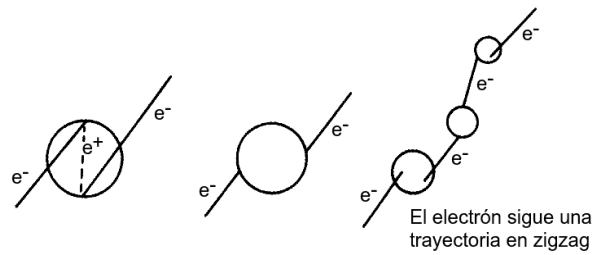


Figura 3: Un electrón choca, aniquilándose, con el antielectrón de un par virtual, quedando libre el electrón de dicho par. Esto implica una trayectoria efectiva zigzagueante de los electrones en el vacío cuántico

Si razonamos como Einstein lo hizo en su teoría de la gravitación, podemos decir que el electrón sigue una trayectoria libre en un espacio fractal.

Esta visión del vacío que nos presenta la física cuántica recuerda el pleno aristotélico:

El mundo para Aristóteles es denso. Su universo es una plétora, sobrecargada como un cuadro cubista de cuerpos entrelazadas y estrechamente superpuestas, porque todo debe ocupar su lugar y esto entraña por su definición que todo se encuentra apretadamente rodeado de otros cuerpo.

La gravedad cuántica

Hasta ahora hemos comentado la relatividad general, la teoría de la gravitación de Einstein, por un lado, y la física cuántica por otro, como teorías independientes. Sin embargo, existen teorías en que se propone una unificación de la gravedad y la física cuántica, lo que denominan *gravedad cuántica*. Se tienen básicamente dos enfoques, el de las *supercuerdas* y el de los *lazos cuánticos*. En ambos enfoques el espacio-tiempo es algo complejo en que, en escalas infinitesimales, no se conserva la topología, y en que se crean y se destruyen burbujas espacio-temporales y otras estructuras geométricas. El espacio queda cuantificado en sólidos elementales y se tienen muchos tiempos, "relojes", paralelos (véanse las figuras 4a y 4b).

ESPACIO Y TIEMPO EN LAS ARTES PLÁSTICAS

Un poco en paralelo con la evolución de las concepciones del espacio y el tiempo en las ciencias naturales, éstas han evolucionado de modo similar en las artes plásticas y, en particular, en la pintura.

En lo anterior se ha considerado el espacio y el tiempo como continuos, y aunque en el caso de la gravitación de Einstein se tengan distorsiones se conserva la continuidad del espacio. Esta continuidad se rompe en el cubismo.

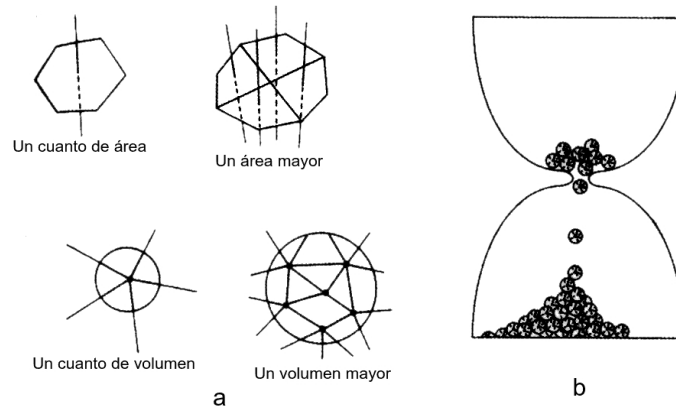


Figura 4: (a) Cuantos de área y volumen en la teoría de lazos de la gravedad cuántica. (b) El tiempo avanza por los tic-tac discretos de innumerables relojes.

El espacio en el cubismo

Como comentábamos al hablar de la concepción aristotélica del espacio, cabe mencionar al cubismo, movimiento artístico de la primera mitad del siglo XX, del que algunos de sus rasgos son:

- *Los cuadros cubistas plantean la unidad de la forma.* En la misma imagen se unen el ser real y el recuerdo que su presencia evoca.

Cada cosa es reproducida con formas en las que coinciden al mismo tiempo diversos ángulos de visión: desde el frente, desde lo alto, desde los escorzos más oblicuos y, todo ello, en la misma imagen. Las formas se superponen, se entrecruzan –las interferencias oblicuas son de las más fecundas invenciones del cubismo–, se desvanecen sin que para ello intervenga ninguna espacialidad, ninguna ley óptica que regule el tamaño de las formas según su posición.

- *El espacio cubista puede ser recorrido con la mirada, pero no por los pies.*

Una de las soluciones cubistas en la estructuración de las formas es imbricar los planos de manera que las imágenes no se sucedan, sino que se generen espontáneamente.

- *Se trata de unir los diversos aspectos de un objeto.* Los temas flotan en el recuerdo, presentando todas sus superficies, todos sus escorzos. Como tema más representativo de esta simultaneidad señalaremos el de la cabeza de frente y de perfil.

En las figuras 5 y 6 se presentan dos cuadros cubistas de Picasso. En el cuadro de la figura 5, *Maya con muñeca y caballito*, se presentan las caras de frente y de



Figura 5: Pablo Picasso, *Maya con muñeca y caballito* (París, 1938).

perfil, y en la figura 6 se presenta un detalle del *Guernica*, en el cual está presente una gran tensión emocional.

Ante esta riqueza del espacio y del tiempo, de la forma y del movimiento, muchos artistas tratan de captar de modo abstracto rasgos significativos de esta dinámica espacio-temporal compleja.

UNA PERSPECTIVA DEL ESPACIO Y EL TIEMPO EN LAS ARTES PLÁSTICAS

El arte posibilita una reflexión
sobre nuestra experiencia
de lo Finito y lo Infinito
en nuestra vida y sobre
cómo nos comunicamos
y establecemos relaciones.

Esta experiencia implica movernos,
cambiar y transformarnos
interna y corporalmente.

Con cada movimiento
“dibujamos” en el espacio
y en el tiempo
la forma que tenemos
y quienes somos.



Figura 6: Pablo Picasso, *Guernica*. Detalle (mayo-junio, 1937).

Todo ser humano tiene la inclinación natural a ser un individuo integrado consciente de sí mismo y de su lugar y relación con los demás seres vivos y cosas existentes. Lo importante de la idea de transformación y totalidad es ser una meta que inspira y conduce por un proceso que toma toda la vida. Este proceso fue llamado por Carl Gustav Jung “proceso de individuación”, que describe diciendo:

En general, (el proceso de individuación) es el proceso mediante el cual se forman y diferencian los seres individuales; en particular, es el desarrollo del individuo psicológico como ser distinto de la psicología colectiva general.

La individuación tiene dos aspectos principales: en primer lugar, es un proceso interno y subjetivo, y en segundo término, es un proceso igualmente indispensable de relación objetiva. Ninguno puede existir sin el otro, aunque a veces uno de los dos predomina. (Sharp, 1994: 107-108)

Cambiamos y nos transformamos constantemente cuando respiramos; nos movemos físicamente y modificamos nuestra mente que siempre está activa. Estos cambios internos de la mente toman forma en nuestros cuerpos que se modifican a lo largo de la vida, dependiendo de la etapa biológica y de la de nuestro *proceso de individuación*. Si consideramos que nuestro cuerpo corresponde a quiénes somos y a cómo entendemos el mundo podemos decir que nuestra forma física comunica con veracidad qué pensamos, qué sentimos y cómo actuamos. Siendo que cada individuo tiene una forma, observando cómo es y cómo cambia, conocemos lo que nos distingue o asemeja al reconocer la corporalidad particular: cómo y cuándo alguien se mueve y con qué intención, hacia dónde se dirige y cómo llega a ese

punto, cómo se relaciona con el espacio, cuáles son las calidades dinámicas de sus movimientos, es decir, cómo se comunica y expresa.

Rudolf Laban fue un artista interdisciplinario, nacido en 1879 en la actual Eslovaquia; investigó el movimiento desde distintos marcos teóricos.¹ Al hablar de movimiento nos dice:

Movimiento es, por decirlo de algún modo, arquitectura viviente, viviente en el sentido de cambio constante. Esta "arquitectura" es creada por los movimientos corporales, y estos movimientos realizan recorridos en el espacio, creando formas cuya esencia es el cambio, la transformación constante. (cit. en Urreta, 1996)²

Esta idea básica del movimiento se relaciona con su concepto de *constelación* que nos recuerda que la relación entre las partes del cuerpo siempre cambia, porque estamos vivos y respiramos. Estas relaciones "dibujan" una forma en el espacio y es la manifestación de cada individuo según su plasticidad corporal, que es nuestra capacidad para adaptarnos al medio ambiente. La adaptación está vinculada al *proceso de individuación* en el sentido de que el rango de movimientos que un individuo emplea para comunicarse y expresarse se modifica con el tiempo conforme crecemos e integramos los diversos aspectos de nuestra persona, armonizando el manejo corporal que es más consciente, orgánico y congruente con quienes somos. Es importante señalar que ésta situación es más compleja y puede ser entendida desde otros puntos de vista que consideran nuestro tipo de cuerpo y sus características.³

Visualizando el concepto de constelación de Laban y recordando que cada quien "dibuja" una forma que se transforma continuamente en el espacio y en el tiempo, podemos encontrar similitudes entre las formas que dibujamos y las que se han identificado en el cielo formadas por estrellas. Si imaginamos a cada parte de nuestro cuerpo como luz, especialmente las articulaciones, estos puntos luminosos constituyen una constelación corporal que se mueve velozmente con respecto a las celestes. Imaginando a varios individuos juntos, cada uno como una estrella, tenemos una constelación de constelaciones cada una (cada *individuo-constelación*) con sus particularidades; un grupo de estas constelaciones de constelaciones dibujan otra mayor, y así sucesivamente. Esta imagen también puede ser contemplada microscópicamente visualizando qué forma tienen las partes iniciales internándonos en nuestro cuerpo físico.

La imagen de la forma (constelación) que cada ser humano tiene y dibuja, está relacionada con otro concepto de Laban, el de *kinesfera*. Kinesfera es la idea de que

¹ Algunas de las teorías en las que Laban organizó sus investigaciones son la Notación Laban, el Movimiento Coral, Coreútica o Armonía del Espacio, y *Effort/Shape*.

² Pilar Urreta es coreógrafa, bailarina e investigadora especializada en el Análisis de movimiento Laban. Pertenece al Sistema Nacional de Creadores de México.

³ En el *Ayurveda*, la parte médica de los Vedas, se explica que hay tres tipos de constituciones físicas básicas llamadas *Doshas* que existen combinadas. Cada una describe rasgos generales de los seres humanos tanto físicos como psicológicos. En principio cada quien *es* físicamente de acuerdo a cómo *es* internamente, por lo que nuestro cuerpo corresponde a quiénes somos y viceversa. Desde esta perspectiva tenemos el cuerpo que necesitamos para experimentar el mundo y por tanto incluso los padecimientos físicos tienen un motivo que llevan a ese individuo a una reflexión personal necesaria.

alrededor de nosotros hay un espacio que podemos alcanzar, que a la vez es nuestro límite. Es como una burbuja que refleja la intencionalidad de un movimiento en sentido amplio; es tocada del centro hacia afuera y equivale a nuestro campo energético. Este campo energético, o kinesfera, es generado por todo ser vivo y es el espacio donde se establece el contacto, las comunicaciones y las relaciones. La imagen es similar a una esfera de luz integrada por múltiples puntos luminosos moviéndose.

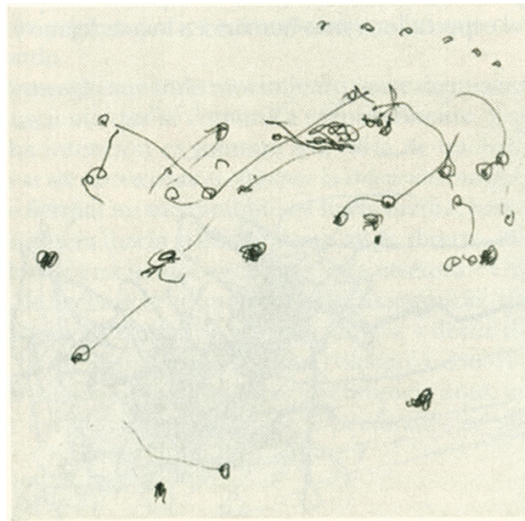
Lo que vemos de un individuo externamente a través de su cuerpo es inseparable de quién es, porque nos movemos según somos. Se puede plantear que lo que somos define lo que se ve (lo interno afecta lo externo), y que lo externo modifica lo interno, que equivale a que si trabajamos con nuestro cuerpo modificamos nuestra forma de pensamiento. Que un movimiento modifique la visión del mundo de un individuo implica que existe una estrecha relación entre cuerpo y mente, de tal modo que los pensamientos y sentimientos literalmente toman forma física.⁴ La forma que “queda dibujada” en el espacio cada que nos movemos es como una huella que nos identifica, que aunque varía según nuestro manejo espacial y la calidad de los movimientos que realizamos, mantiene lo que nos distingue de otros, puesto que cada quien tiene una determinada calidad energética, y que incluso cuando varias personas realizaran los mismos movimientos percibiríamos diferencias.

El planteamiento inicial de este texto es que el arte posibilita una reflexión sobre nuestra experiencia de lo finito y lo infinito en nuestras vidas y sobre cómo nos comunicamos y establecemos relaciones que “dibujan” en el espacio y el tiempo la forma que tenemos y quiénes somos. Esos dibujos “que vemos” incluyen las imágenes mentales que contienen sentimientos y pensamientos. Una posibilidad de plasmarlo es dibujarlo y crear una imagen concreta que se convierta en un portal para experimentar situaciones que incluyen olores, sensaciones, recuerdos, visualizaciones, intuiciones y todas nuestras vivencias personales que se relacionan entre sí llevándonos en ocasiones a clarificar cuestiones individuales que estamos atravesando u otras que parecían inexistentes.

Los dibujos a los que me referiré están contemplados como imágenes relacionadas con el tema de cambio, movimiento, espacio y tiempo; pero también son propuestas artísticas donde es importante la situación que los originó. El motivo y origen aquí son vivencias diversas durante sucesos escénicos dancísticos durante los cuales era un *espectador-creador*, ya que los dibujaba durante sus ensayos. La elección de dibujar los movimientos de bailarines, varios de ellos también coreógrafos, es que son individuos en general conscientes de que se mueven, pues es a partir de sus movimientos que crean propuestas; dibujar los movimientos de alguien que busca generar una reflexión en otros es más completo que poner atención en lo que hace alguien que no sabe qué está haciendo. Dibujar durante un ensayo es dibujar durante alguna parte de su proceso creativo y de individuación. Esta situación es particular porque usualmente sólo se conocen las propuestas con-

⁴ Hay distintas técnicas terapéuticas que inician con trabajos corporales para liberar esas formas de pensamiento y emociones del cuerpo y hacerlas conscientes.

cluidas y no lo que sucedió en el camino, que en mi opinión, es tan importante como la obra artística, si no es que más; la obra queda para ayudar a otros en sus procesos y caminos. Quien ve un suceso escénico es un espectador; quien lo ve y crea simultáneamente es un *espectador-creador*. El primero está "afuera" del suceso; el segundo trabaja a partir de lo que percibe en el momento, integrándolo. Alguien que crea *a posteriori* del suceso es únicamente un creador, y su obra es distinta porque ha tenido tiempo de asimilar lo que vivió. Lo importante de la obra creada durante el suceso es su inmediatez, puesto que dibujar simultáneamente a éste implica un proceso de percepción, asimilación y transformación que queda visible en una imagen gráfica. De lo que ocurre durante un suceso espacio temporal se pueden observar y dibujar infinidad de situaciones. Lo que sucede, lo que no, lo que hacen y se dan cuenta, y lo que se les "escapa", lo que sucedió antes –que es la intención–, lo que quedó después de que se movieron –que es como una estela, un sonido o un ruido–, lo que generaron, lo que proyectaron, cómo se desplazaron, la carga emocional, las distintas calidades de los movimientos, cómo usan el espacio, cómo es su plasticidad, cómo cambian de forma, la esencia de todo lo que sucede, los detalles y los gestos, la forma que sintetiza lo más importante, su velocidad, sus ritmos, sus silencios, etc. Dependiendo de qué se observa, los dibujos son *mapas del suceso* o *retratos de los ejecutantes* (dibujo 1).



Dibujo 1

El dibujo 1 (24-marzo-03 [1]) puede ser visto como el *mapa de una constelación*. Fue realizado durante ejercicios de práctica entre bailarines donde no existía ninguna intención común. Cada punto corresponde a un individuo en movimiento, del que lo importante es su ubicación y relación con los otros *puntos-individuos*.

La diferencia entre los puntos es su intensidad, y las líneas que los unen indican que se desplazaron, se imitan o comunican entre sí. La imagen de esta cons-

telación, azarosa, podría percibirse en otro contexto como en una reunión (cena, festejo) o una inauguración o estreno de montaje donde los encuentros también son espontáneos.



Dibujo 2

El dibujo 2 (18-sep-02. *Escénico bidimensional 1*) es un mapa de por dónde se movieron en el espacio. El motivo inicial tanto de éste como del dibujo 3 es un montaje coreográfico de Pilar Urreta:

La coreografía *Marcar el árbol del tiempo con una señal* está inspirada en la obra plástica de Federico Silva. La danza propone una idea principal: el encuentro entre el tiempo escultórico y el tiempo humano. El tiempo escultórico, lento y alargado, que nos permite vislumbrar un sentido de permanencia; el tiempo humano, fugaz, breve, que nos impulsa a la experiencia de la vida. El encuentro entre ambos tiempos nos hace entrever que nuestro tránsito es proyectado más allá de la brevedad. El movimiento de la piedra sucede a lo largo de los siglos; el movimiento del hombre habita en un solo respiro. En el centro de estos dos tiempos el hombre construye su visión de existencia.

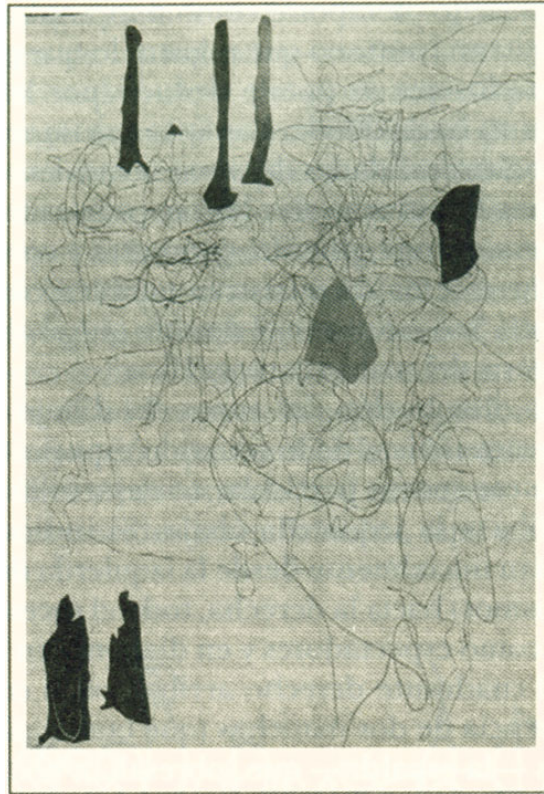
El tiempo en el escenario, como lo explica, está planteado de lo más cercano al espectador y más humano, a lo más lejano y permanente, que es dónde coloca la escultura de Federico Silva al fondo del escenario. Lo que sucede atrás se relaciona con el tiempo escultórico y lo que sucede al frente con nuestra cotidianeidad. Dado que la imagen es la correspondencia de un suceso espacio temporal en cuatro dimensiones (las tres físicas y la temporal) en dos (vertical y sagital), el dibujo nos permite visualizar cómo se vería la totalidad de dicho suceso si pudiéramos "ver" cómo y por dónde se modifica el espacio y el tiempo con nuestra presencia y acciones. En el espacio-tiempo que experimentamos físicamente, los bailarines colisionarían; lo que vemos de ellos es lo que van haciendo, es decir, la continuidad del suceso. En el espacio ficticio del dibujo podemos ver simultáneamente lo que dibujaron en el espacio en el transcurso del tiempo y algunos aspectos de cómo.

Cada una de las ocho líneas que inicia a la izquierda corresponde a los bailarines principales que eran cuatro; cada uno de un color con dos tonos cada quien y una línea por cada vez que entraban en escena. Las líneas pequeñas de la parte superior corresponden a los que caminaban “sin tiempo” al fondo.

Se ha planteado que todo movimiento parte de una intención consciente o inconsciente que se comunica corporalmente, y que la manera en como dicha intención es comunicada varía de un individuo a otro. *Observar cómo es un movimiento es observar la intención con que éste se realiza*. En su aspecto formal un movimiento es hacia arriba, hacia abajo, hacia adentro, hacia afuera, hacia adelante, hacia atrás, directo, indirecto, como arco, como flecha, creciendo, encogiéndose, etcétera.⁵ Un aspecto más sutil y difícil de reconocer es qué se quiere comunicar, qué motiva ese movimiento, qué está sintiendo quien se mueve y desde dónde lo realiza... que es desde donde se relaciona consigo y con el mundo. Con respecto a los dibujos a los que se hace referencia aquí, aun cuando es evidente que los movimientos y gestos personales se mezclan con la intención del montaje escénico, se buscó que la imagen refleje la intención de las propuestas y no las situaciones personales de los bailarines, que, en su caso, pueden reconocerse en la temática de éstas, dado que todo artista crea desde su visión y situación particular. Este aspecto debe ser abordado en otro contexto.

El dibujo 3 (27-sep-02. *Escénico bidimensional 3*) es un mapa de cómo y por dónde con atención a la manera de los movimientos. Si “cómo” incluye una intención, este mapa tendría que mostrarla. Para que el consumidor del dibujo reconociera la intención de la coreografía a partir de éste habría que narrarle lo sucedido, lo cual se convertiría en anécdota dirigiendo, y hasta reduciendo, la posible experiencia que la imagen pudiera provocar. Lo habitual es buscar referentes a las obras artísticas en esta necesidad de intelectualizar lo que estamos percibiendo. Cualquier obra artística funciona a distintos niveles de percepción, por lo que nos podemos relacionar con ella conociendo su origen y lo que representa o, únicamente, experimentando la sensación que provocan los elementos que la componen y su organización permitiendo que esa vivencia aparentemente simple detone otras. Cuando no se conoce el motivo inicial, la relación con la obra se basa en qué sentimos ante ella. En estos dibujos está plasmada tanto la intención del coreógrafo y de los ejecutantes, como la del dibujante, en cuanto a qué buscaba y cómo lo concretizó; qué significan las líneas, los colores, su ubicación, distribución y relación. Los comentarios son aquí con respecto a las correspondencias de las dimensiones de un suceso a una imagen, de lo que vivimos cotidianamente a su representación, de lo que percibimos tridimensionalmente y en movimiento a un supuesto instante en el que la totalidad de lo continuo se experimenta simultáneamente (27-Sep-02. *Escénico bidimensional 3*) En cuanto al título es una guía que indica el día del suceso (cuándo), señalando la importancia de que cambiamos, y, por tanto, el suceso, la experiencia y lo dibujado serían, si acaso, sólo similares en otro momento. “Escénico” refiere al motivo inicial (la posible anécdota a contar) y “bidimensional” a su correspondencia gráfica. He

⁵ Para más detalle sobre cómo es un movimiento consultar las teorías de Rudolf Laban de *Correútica* y de *Effort/Shape*.

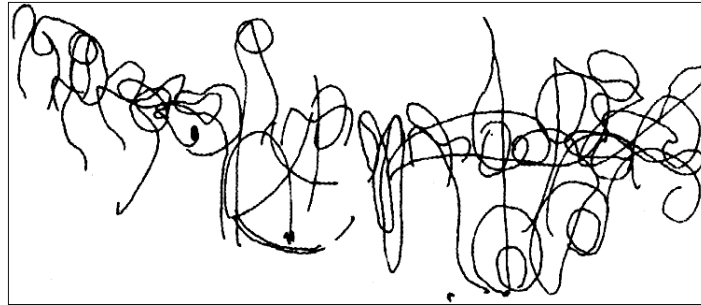


Dibujo 3

indicado que este dibujo y el anterior tienen como motivo la coreografía *Marcar el árbol del tiempo con una señal* de Pilar Urreta, que es referente en cuanto a la imagen como tal; su relevancia como evento simultáneo implica profundizar en los puntos comunes y distintos entre las artes plásticas y la danza. Las correspondencias entre suceso y dibujo son las siguientes: las pequeñas líneas del fondo del dibujo anterior (sujetos "sin tiempo" en escena) son ahora presencias, cuya forma es una silueta plana (recortes de vinil adherible, aquí manchas) que aparecen arriba erigidos, cercanos al tiempo escultórico y abajo (al frente), sentados representando el tiempo humano y testigos de lo que sucede "en el medio" en ambos tiempos (interpretación personal de la coreografía).

Aquello que es tanto atemporal como temporal, lo de en medio, queda dibujado como un continuo que registra lo que pasó, lo que pasa y lo que no ha pasado, que se puede deducir por la intención y los detalles que marcan un hacia dónde. Las líneas ya no se apegan al espacio físico sino que indican calidades de cómo se movieron: si hacia fuera, cuya actitud es abrirse, mostrarse, dar, lanzar, proyectar... o hacia adentro que toma, observa, recoge, asimila, concentra y contrae.

Los dibujos que son mapas muestran también cómo se movieron tridimensionalmente. Son mapas en el sentido que al observarlos podemos conocer la síntesis del suceso coreográfico.



Dibujo 4

En cuanto a la distribución, las zonas del dibujo “ocupadas” por líneas describen características de lo ocurrido espacio-temporalmente. Podemos decir que ese suceso particular se desarrolló principalmente de la derecha arriba a la izquierda abajo. Si indico que todos los ejecutantes se movían inicialmente desde la izquierda del espectador (la derecha de ellos mismos) hacia la derecha, todo el suceso tiene un ritmo izquierda-derecha como espectadores y en diagonal en la imagen. En el dibujo sobresale el cuadrante derecho arriba por la concentración de líneas y por la presencia de dos manchas (que buscan acentuar la parte del cuerpo de ellos –la espalda– que sobresalía), ubicación, que relacionada con los ejes cardinales, corresponde a noreste. Continúa preguntarse qué significa que algo suceda en esas zonas y direcciones. Las líneas de entrada son por la izquierda al centro y abajo de nosotros, y las salidas, que también son dos aquí, por la derecha al centro y arriba (izquierda de ellos). Lo siguiente será visualizar “la escena” tridimensionalmente e imaginar qué se sentiría estar allí y cruzar un espacio con esas características; si éstas son resultado de lo que generaron algunos individuos al moverse cabe preguntarse por qué quedaron éstas y no otras, en qué son diferentes y cómo percibimos éstas y otras. De un dibujo realizado durante un ensayo de coreógrafos donde se buscaba capturar los movimientos que los bailarines realizan con sus calidades y dinámica, nuestra reflexión se amplía a qué hacemos y provocamos a nuestro alrededor cada que respiramos y estamos, cuándo y dónde, y eso qué es y qué implica. Lo que cada individuo hace y genera es muy diverso y amplio. La imagen de los *individuos-constelaciones-esféricas* mencionada anteriormente deriva de buscar qué generamos espacio-temporalmente en el nivel energético al movernos. Algunas personas se proyectan manteniendo su centro, otras desplazan su centro de lugar, unas más se desplazan y transforman, en tanto otras se transforman sin cambiar de ubicación. El dibujo 4 es la imagen de alguien que se desplaza sin transformarse. La sensación es que avanza cambiando de ubicación mas no de calidad. Siendo que gira, envuelve y desenvuelve, el sujeto de la imagen se desplaza sin prisa como

si llegar a (la derecha arriba) no fuera urgente. Por la ubicación de las líneas en la parte superior la sensación es que es ligero y flota, impresión que cambiaría si los mismos trazos estuvieran en la parte inferior provocando que ese sujeto –que flota, no pesa y no tiene urgencia– se desliza en la tierra, aquí y ahora.



Dibujo 5

El dibujo 5 está compuesto por un conjunto de líneas que ocupa el espacio diagonalmente en ángulo, más otra zona independiente vertical a la derecha abajo. La primera sensación es que el movimiento es descendente y avanzando de izquierda a derecha.

A diferencia del dibujo 4, no se conservan las calidades iniciales, ya que al inicio las líneas son pequeñas, irregulares y encimadas (ensimismadas, cerradas, hacia adentro, concentradas) y, posteriormente, se extienden y tornan más suaves y fluidas. Parece incluso que el sujeto se acerca y ya no es el mismo lo que hace que la imagen corresponda a una transformación.

Lo dicho con respecto a las imágenes es una de las múltiples posibles lecturas que tienen, y es probable que provoquen experiencias distintas a lo descrito, incluso que su interpretación parezca distante. Habrá otros que prefieran no conocer las anécdotas y descripciones para que no interfieran en su percepción. Aquellos no familiarizados con este tipo de imágenes tal vez agradezcan más información. La intención es recordar situaciones básicas; a los conocedores que el concepto de arte está cambiando y que las imágenes comunican y provocan más de lo que se piensa, y que muchas veces aparecen situaciones que no se contemplaban, más importantes y congruentes, tanto con el creador como con la situación que la propuesta expone; a los menos relacionados con estas propuestas, invitarlos a que exploren

vincularse con las maneras más antiguas y directas que hemos tenido para comunicar nuestras experiencias espacio-temporales individuales y grupales. Poco servirá en el futuro delimitar las visiones a los campos particulares. De más ayuda será comparar puntos de vista y relacionarlos para crear una imagen más completa de lo que somos y de dónde estamos. Así como un artista crea imágenes muchas veces difíciles de llevar a palabras, porque las reducen, aunque las expliquen y las hagan comprensibles y más fáciles de asimilar para algunos, los investigadores de otras disciplinas complementan con planteamientos más tangibles lo que las imágenes transmiten, de modo que la imagen creada es más completa. Queda en quien conozca ambas perspectivas formarse la imagen y visión que más le oriente y ayude.

COMENTARIOS FINALES

Como comentábamos al principio de este trabajo, en la época actual estamos inmersos en una crisis generalizada, en la cual se tienen cambios rápidos en diversos aspectos y en que las barreras entre especialidades tienden a borrarse. Esto hace que sea importante la interrelación entre diferentes puntos de vista y diferentes facetas de la naturaleza, lo que hace necesario tender puentes entre las diversas ciencias y entre éstas y las humanidades y las artes. Uno de los modos de tender esos puentes es el examen de conceptos fundamentales, comunes a las ciencias, las humanidades y las artes, vistos desde ángulos diferentes. El ayudar a tender esos puentes es el objetivo principal de este trabajo, que aunque esquemático, esperamos sirva para despertar inquietudes que eventualmente conduzcan a nuevos planteamientos educativos y de práctica social.

REFERENCIAS

- Sharp, Daryl. 1994. *Lexicon jungiano. Compendio de términos y conceptos de la psicología de Carl Gustav Jung*. Chile: Ed. Cuatro Vientos.
- Urreta, Pilar. 1996. "Rudolf Laban, renacentista del siglo XX". *Educación artística*. México: INBA-CNNA, núm. 13, abril-junio.

⊙ *Esta es una página en blanco.* ⊙

COMPLEJIDAD EN COMPORTAMIENTOS UNIVERSALES EN LAS ARTES Y EN LAS CIENCIAS *

PLANTEAMIENTO

EN 1977 la obra póstuma de un visionario, el embriólogo, geólogo y filósofo inglés Conrad Waddington, *Las herramientas del pensamiento* (1977), da inicio con el siguiente texto:

Hoy las cosas van mal tantas veces y en contextos tan diferentes, que mucha gente comienza a sentir que es su modo de pensar sobre el funcionamiento del mundo el que debe estar errado. Creo que esta sospecha probablemente tiene sustento. Los modos como se conciben las cosas, que han sido aceptados en el pasado y que se han vuelto sentido común, en realidad no funcionan en todas las circunstancias y muy probablemente hemos llegado a un periodo de la historia en que este buen sentido no corresponde a los procesos que en general ocurren en el mundo [...] Hoy debemos ser capaces de pensar no solamente en sistemas simples, sino en sistemas complejos.

En el epílogo del mismo libro, Waddington concluye que es imperante “el desarrollo de herramientas para el pensamiento, adecuadas para los sistemas complejos”. La vigencia de este texto es más que evidente.

Al margen de su definición, los sistemas complejos son fácilmente identificables, por ejemplo: la turbulencia, los huracanes, los sismos, una célula, el sistema nervioso o el inmunológico, el desarrollo urbano, el sistema de salud o el de seguridad pública, la evolución de ecosistemas, el estudio de los mercados, de la bolsa de valores, la mente, conciencia y lenguaje, en fin, la lista es larga (Martínez-Mekler, 1993, 2000; Martínez-Mekler y Cocho, 1998). Al considerar el estudio de estos sistemas, la transdisciplina resulta indispensable, los comportamientos no lineales son recurrentes, y aparecen jerarquías de niveles de descripción, así como propiedades que emergen de comportamientos colectivos.

En este escrito, siguiendo la pauta marcada por Waddington, proponemos una herramienta de naturaleza estadística para el estudio de los sistemas complejos, encaminada a establecer clasificaciones que permitan tender puentes y descubrir analogías que contribuyan a un mayor entendimiento de los mismos. Basados en

* Ensayo escrito por Gustavo Martínez Mekler y Germinal Cocho. Publicado en: Flores Valdés, J. y Martínez Mekler, G. (eds.), 2009. *Encuentros con la complejidad*. México: UNAM / Siglo XXI.

una amplia fenomenología, mostramos que para situaciones de naturaleza muy diversa el ordenamiento decreciente de alguna de sus propiedades presenta un comportamiento estadístico generalizado. La forma en que se distribuyen estas propiedades al ser ordenadas por su grado de importancia o rango, satisface una relación funcional que depende de dos parámetros de ajuste (Martínez-Mekler *et al.*, 2009). Se trata de una generalización de la distribución beta (Bury, 1999) y viene dada por la función $f(r) = A(N + 1 - r)^b / r^a$, donde r es el rango, N el máximo valor que puede tomar r , A cumple el papel de una constante de normalización y (a, b) son dos exponentes de ajuste a los datos. En nuestro estudio mostramos que esta forma se presenta tanto en las ciencias naturales y sociales como en las artes. Proponemos que el comportamiento de los parámetros puede identificar rasgos del sistema en cuestión y aportar nuevas consideraciones para el estudio de fenómenos complejos, por ejemplo, la naturaleza de procesos creativos en el arte, o el papel de la estructura, dinámica y funcionalidad en redes biológicas y sociales. En estos últimos casos, que son representativos de redes complejas, los ajustes son extraordinarios y ambos parámetros toman valores significativos que son comparables. La ubicuidad de este comportamiento “betoide” es asombrosa y plantea el reto de agrupar las situaciones bajo estudio en familias o clases de universalidad, determinadas con base en los valores de los parámetros de la distribución.

En las páginas subsecuentes mostramos primero una amplia fenomenología sobre distribuciones ordenadas por rango, y posteriormente desarrollamos modelos encaminados a proporcionar un significado a los parámetros de función de la distribución. Nuestras observaciones, aunadas a los resultados de los modelos nos llevan a resaltar la importancia en los fenómenos complejos de la confluencia de varios procesos de naturaleza heterogénea, de constricciones que inducen correlaciones, así como de la presencia de dinámicas en conflicto. Discusiones al respecto se presentan al final del capítulo.

FENOMENOLOGÍA

Universalidad en fenómenos críticos

En el estudio del comportamiento de la naturaleza el desarrollo de una fenomenología es piedra angular para su entendimiento. La clasificación y análisis de un cúmulo de observaciones y evidencias experimentales eventualmente da lugar al desarrollo de modelos y teorías. Un ejemplo relativamente reciente de ello, proveniente de la física, es el estudio de los fenómenos críticos que se pueden presentar en las transiciones de fase de la materia, tales como la desmagnetización de un imán o la ebullición del agua que lleva de la fase líquida a la gaseosa. En este tipo de transiciones algunas cantidades físicas como la capacidad calorífica que mide la facilidad con la cual un material sube su temperatura al calentarse, o la susceptibilidad magnética que mide la propensión de un material a magnetizarse ante la presencia de un campo magnético externo, divergen al infinito en la cercanía de una temperatura conocida como la temperatura crítica. La forma en que se van a infinito alrededor de la temperatura crítica está caracterizada por potencias del in-

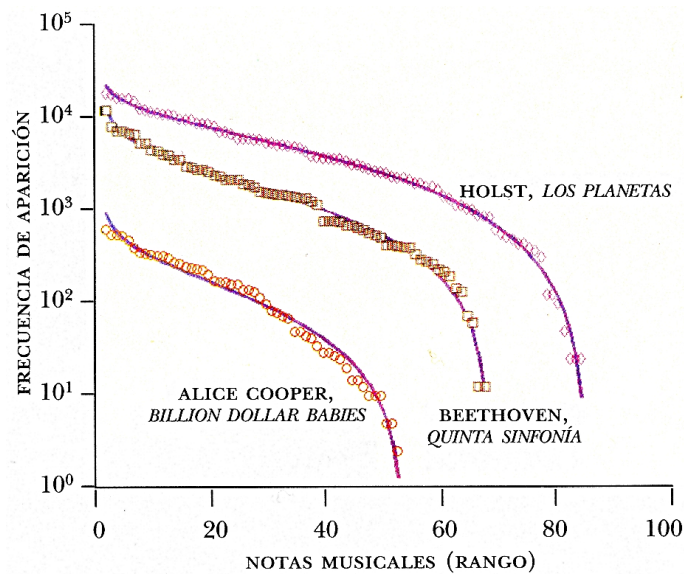
verso de la proximidad a la temperatura crítica. Estas potencias se conocen como exponentes críticos y toman valores determinados con alta precisión.

Lo sorprendente es que estos valores coinciden para una gran variedad de fenómenos de naturaleza muy diversa como son las transiciones en aleaciones metálicas (de una fase compuesta por metales disociados a una fase rica en aleaciones), mezclas de fluidos complejos de varios componentes (*e.g.*, de una fase compuesta de polímeros en solución a una rica en agregados, por ejemplo micelas en solución), superconductores (de una fase de conducción normal a una fase superconductora), entre muchos otros. Con base en la concordancia de los valores de los exponentes críticos se forman familias de sistemas que constituyen clases de universalidad. Sucede que bajo las condiciones de criticalidad, muchos de los detalles de las interacciones entre los componentes del sistema resultan ser irrelevantes para la determinación numérica de los exponentes, los cuales sólo dependen de propiedades esenciales como son la simetría y el alcance de las interacciones. En 1971, Kenneth Wilson recibió el Premio Nobel de Física por el desarrollo de la Teoría del Grupo de Renormalización (Wilson, 1979; Kadanoff, 2000) que da un fundamento a la universalidad en los fenómenos críticos. Cabe mencionar que mucho del formalismo empleado en su tratamiento provino del estudio de las partículas elementales de la materia. Este logro sólo pudo darse después de decenios de trabajos experimentales y tratamientos fenomenológicos (Stanley, 1971). En el caso de los fenómenos críticos la universalidad se debe a que el sistema presenta estructura y correlaciones observables a todos los granos de resolución, con comportamientos que no varían ante cambios de escala. La universalidad está ligada a que no es necesario ni es suficiente el conocimiento detallado del comportamiento e interacciones de los componentes para la determinación de la propiedad colectiva del sistema. Esta característica se presenta reiteradamente en los sistemas complejos y ha llevado a que se diga que para los sistemas complejos *el todo es mayor que la suma de las partes*, y a que en ocasiones se califique el estudio de los sistemas complejos como antirreduccionista. Estas aseveraciones deben ser tomadas con cautela, pues desde nuestro punto de vista, el enfoque de la complejidad requiere de y complementa a los estudios reduccionistas.

Las artes: literatura, música y pintura abstracta

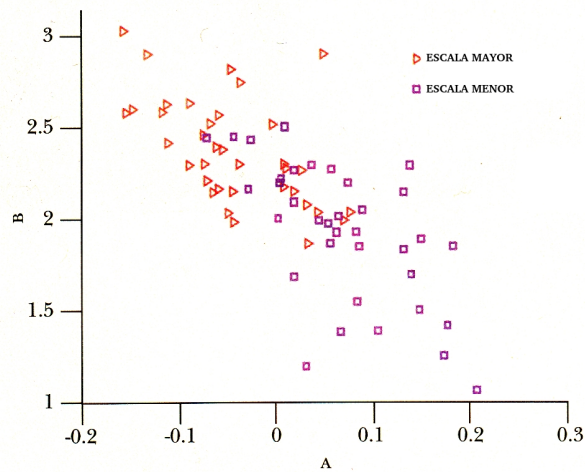
En los años 30 del siglo pasado, el filólogo G. K. Zipf analizó las frecuencias con la cuales distintas palabras aparecían en textos y encontró que al graficarlas en orden descendente, según su "rango", se obtenía, al usar ejes logarítmicos, una recta con pendiente -1 (Zipf, 1949). Dicho de otra manera, la relación frecuencia/rango sigue una ley de potencias con un exponente -1 . Este tipo de comportamiento se denominó la "ley de Zipf". Si bien en un inicio los textos estudiados, tales como el libro *Ulises* de James Joyce, cumplían con esta ley, al revisar un mayor número de escritos de diversa naturaleza y tamaño, es frecuente que la ley de potencias se pierda para valores de alto y bajo rango, la recta se "curva" en sus extremos. Varios tratamientos han sido propuestos como correcciones al comportamiento de

ley de potencia. Para los valores de alto rango (los menos frecuentes) se dice que por la falta de datos no se logra un comportamiento estadístico significativo y se introducen correcciones, llamadas de tamaño finito, en la forma de factores multiplicativos con decaimientos exponenciales de la forma $\exp(-\xi r)$ o gaussianos con $\exp(-\xi r^2)$, donde ξ proporciona una medida del decaimiento. También se ha llegado a sugerir (Ferrer i Gancho y Sole, 2001) que se presentan dos leyes de escala con diferentes exponentes, uno para valores de rango bajos (palabras más utilizadas) y otro para valores altos (las menos utilizadas). Bajo este enfoque, la determinación del sitio donde se unen las rectas es algo arbitraria. En nuestra generalización de la distribución beta, la transición entre los dos tipos de comportamientos es suave y se encuentra incorporada en la forma funcional.

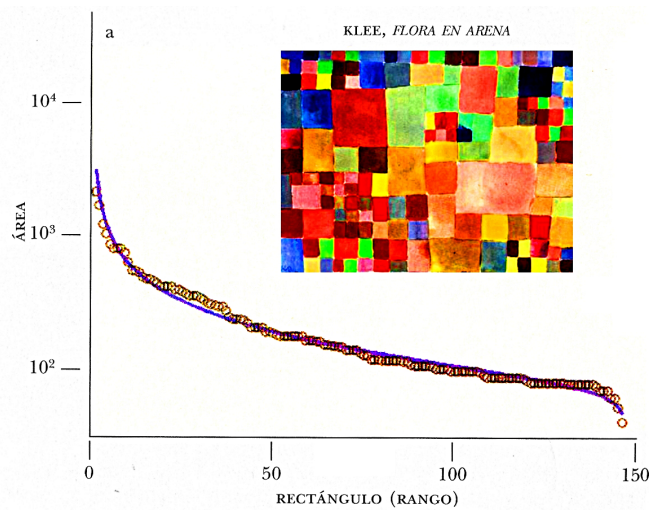


Gráfica 1: Representación en ejes semilogarítmicos de la frecuencia de aparición de notas musicales en las partituras ordenadas en forma decreciente: *Los Planetas* de Holst, *Quinta Sinfonía* de Beethoven y *Billion Dollar Babies* del grupo de rock Alice Cooper. Las líneas corresponden a los ajustes hechos con la distribución beta generalizada con los parámetros (a, b) y cuadrado del coeficiente de correlación, $(a, b, R^2) = (0.23, 1.54, 0.988)$, $(0.42, 1.25, 0.987)$, $(0.71, 1.06, 0.978)$ respectivamente.

Si en lugar de determinar las palabras en un texto se analiza la frecuencia con la cual se utilizan las notas en partituras musicales, podemos también determinar distribuciones de rango-frecuencia. Resulta que nuestra distribución produce ajustes excelentes. La gráfica 1 muestra los resultados para la *Quinta sinfonía* de Beethoven, *Los planetas* de Holst y la pieza *Million Dollar Babies* del rockero Alice Cooper. Los valores de los parámetros de ajuste a y b para cada una de las piezas musicales se encuentran en el pie de la gráfica, junto con la determinación

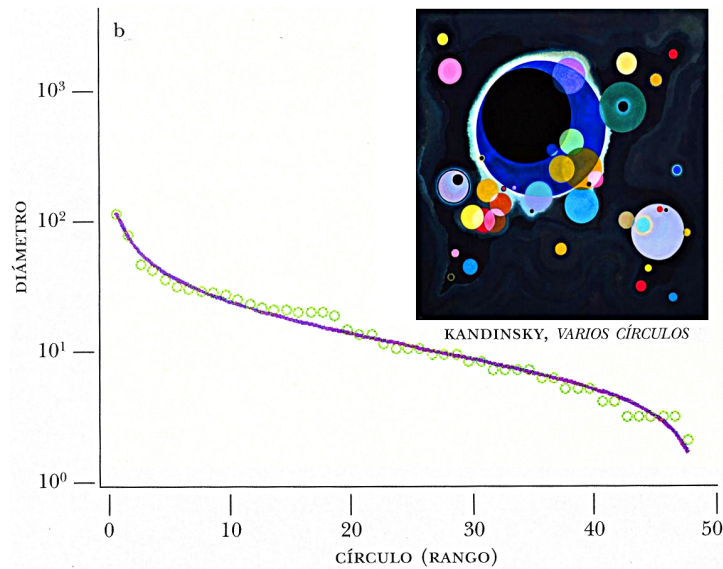


Gráfica 2: Valores de (a, b) del ajuste a las distribuciones de frecuencia-rango de las notas musicales de los preludios y fugas del *Clavicordio Bien Temperado* de J. S. Bach. Los cuadros indican composiciones en escala menor y los triángulos en escala mayor.



Gráfica 3: Distribuciones ordenadas por tamaño de motivos geométricos en pinturas abstractas. Áreas de rectángulos en el lienzo *Flora en la arena* de Paul Klee. Las líneas son ajustes de la distribución beta generalizada con $(a, b, R^2) = (0.70, 0.14, 0.99)$.

del cuadrado del coeficiente de correlación R^2 respectivo, el cual proporciona una medida de la bondad del ajuste. Buenos ajustes llevan a valores de R^2 cercanos a unidad (sin embargo, el inverso no siempre es cierto). En nuestro grupo de trabajo



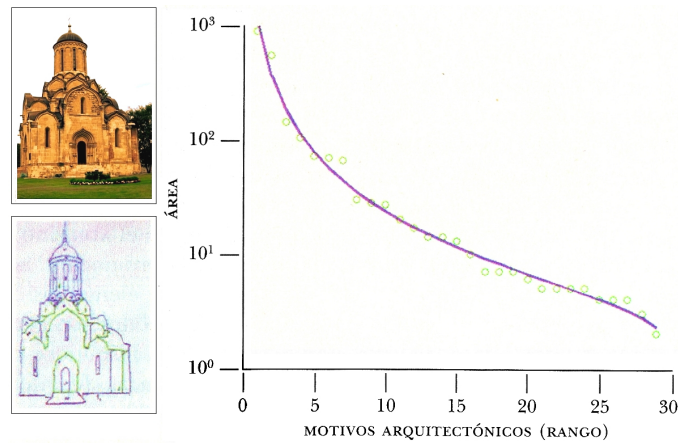
Gráfica 4: Tamaños relativos de círculos en la pintura *Varios Círculos* de Vasili Kandinsky. Las líneas son ajustes de la distribución beta generalizada con $(a, b, R^2) = (0.62, 0.32, 0.97)$.

(Beltrán *et al.*, 2008) el análisis de más de 1800 partituras puso de manifiesto una capacidad clasificatoria de la distribución al constatarse que mientras los valores de los parámetros del rock y jazz tienen un rango de variación semejante, la música clásica cubre un rango más amplio.

Otro ejemplo de la potencialidad para establecer clasificaciones por medio de la pareja (a, b) puede apreciarse en la gráfica 2, donde se muestra que los parámetros para las composiciones que integran la obra del *Clavicordio bien temperado* de Juan Sebastián Bach, son sensibles a la modalidad de las piezas (Beltrán *et al.*, 2008). Las composiciones en escalas mayores tienen parámetros distribuidos en un cúmulo que tienen poca intersección con el de las escalas menores.

Tomando en cuenta que tanto la frecuencia de aparición de palabras como de notas musicales son una medida del "área" relativa que ocupan en los textos y partituras se ocurre explorar cómo se distribuyen los distintos motivos geométricos que aparecen en lienzos de pintura abstracta al ordenarlos en forma decreciente según el área que ocupan en el lienzo. El análisis de obras de Klee, Kandinsky, Mondrian y Malevich muestra de nuevo que la distribución beta generalizada permite excelentes ajustes (Martínez-Mekler *et al.*, 2009). En la gráfica 3 se presenta de mayor a menor el valor del área relativa de rectángulos en el cuadro *Flora en la arena* de Klee y en la gráfica 4 de los círculos de la obra *Varios círculos* de Kandinsky.

También en variedad de edificaciones hemos observado que la distribución del área de motivos arquitectónicos (tales como puertas, ventanas, arcos, etc.) se ajusta con nuestra forma funcional. Como ejemplo mostramos la gráfica 5 que se refiere



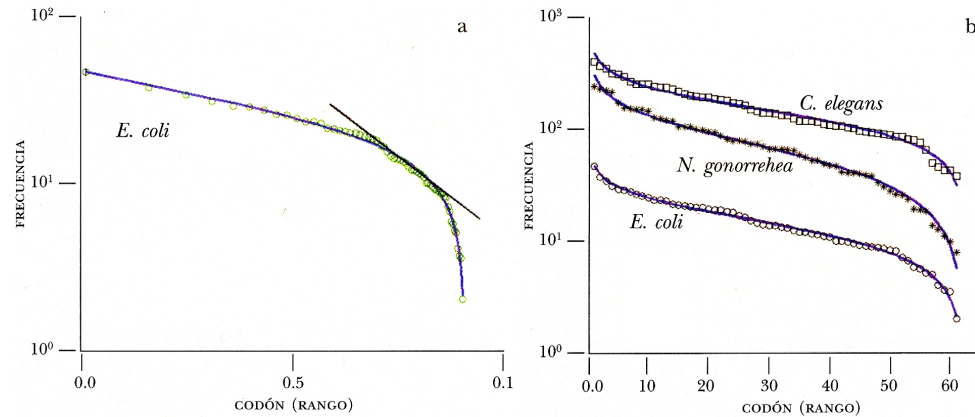
Gráfica 5: Distribución rango-tamaño de motivos arquitectónicos presentes en el monasterio Spaso-Andronikov en Moscú, la línea es el ajuste con la distribución beta generalizada.

al monasterio de Spaso-Andronikov en las cercanías de Moscú. En la referencia (Sánchez Platas, 2007) se analizan otros edificios, por cierto, para el Taj Majal sí se obtiene una ley de potencias, que en nuestro caso implica que uno de los exponentes sea cercano a cero.

Biología

Un nicho natural para el encuentro con los sistemas complejos es la biología. Los sistemas biológicos presentan muchas de las características mencionadas al inicio de este escrito. Una estructura fundamental en la biología molecular es el ADN (ácido desoxirribonucleico), donde se encuentra cifrada la información genética de los seres vivos. El ADN es una doble cadena de nucleótidos organizada en forma de hélice. Los nucleótidos están conformados por un azúcar (desoxirribosa), un radical fosfato y una base nitrogenada (adenina, guanina, citosina o timina). La información genética viene codificada por tripletes de bases que al ser transcritos al ARN (ácido ribonucleico), constituyen los llamados codones. A cada codón le corresponde un aminoácido por medio del proceso de traducción que se lleva a cabo en el ribosoma. La secuencia de tripletes que da lugar a la síntesis de una macromolécula funcional (por ejemplo, una proteína resultante de la concatenación de aminoácidos) constituye un gene. Sucede que al analizar el material genético codificante de una variedad de organismos provenientes de todos los dominios (*archaea*, *bacteria*, *eukaryota*) el ordenamiento en forma decreciente de los codones según su frecuencia de aparición da lugar a una distribución beta generalizada. En la gráfica 6a mostramos el caso de la bacteria *Escherichia coli* en una gráfica log-log. La ausencia de tramos rectos en la gráfica indica que no se tienen comportamientos de leyes de potencias, en cambio, el ajuste a nuestra forma funcional es

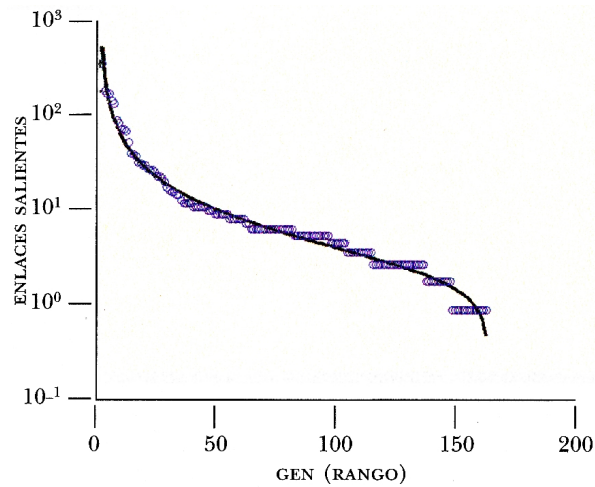
excelente. La gráfica 6b muestra, ahora en escala semilogarítmica, los casos de la lombriz *Caenorhabditis elegans* y la bacteria causante de la gonorrea *Neisseria gonorrhoea*, además de *E. coli*. En la tabla 1 al final de esta sección se presentan los valores de los parámetros del ajuste (a, b) junto con las determinaciones correspondientes del coeficiente de correlación R^2 . Cabe mencionar que si en lugar de considerar los codones se analizan las cadenas de aminoácidos de las proteínas los resultados son similares.



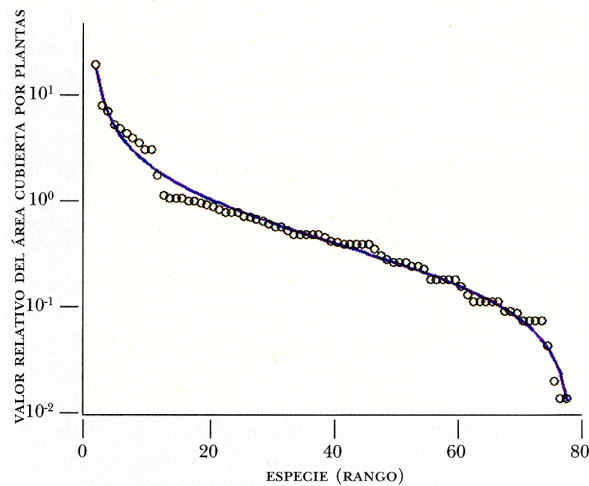
Gráfica 6: Rango-frecuencia en secuencias genéticas. (a) Gráfica logarítmica de la frecuencia en orden descendente con que aparecen los codones en el genoma de la bacteria *E. coli*. La línea recta resalta la imposibilidad de un ajuste con una ley de potencias válida para todos los valores del rango. (b) Gráfica semilogarítmica para la lombriz *C. elegans* y las bacterias *E. coli* y *N. gonorrhoea*. Las líneas son los ajustes a la distribución beta generalizada.

La síntesis de las proteínas es un proceso dinámico muy complejo que no sólo depende de la información codificada en el ADN sino de una intrincada red de regulación que involucra la promoción, activación, inhibición y autorregulación de multitud de elementos. En esta red genética de regulación transcripcional los nodos son genes y los enlaces son señales de activación o inhibición transmitidos por factores de transcripción. Determinaciones estadísticas de interés para las redes son, por ejemplo, el número promedio de enlaces por nodo, la distribución de los nodos según su número de enlaces, ya sea de activación, inhibición o ambos, y la función de densidad de probabilidad de encontrar un nodo con k enlaces. En la gráfica 7 mostramos que la relación rango conectividad para los nodos de *E. coli* sigue la distribución beta generalizada.

En otro ámbito descriptivo podemos examinar el comportamiento de comunidades ecológicas, como es el caso del área ocupada por distintas plantas en terrenos abandonados durante 40 años en el estado de Illinois, Estados Unidos (Bazzaz, 1975). Al igual que en el caso de las áreas en las pinturas abstractas, las distintas especies se ordenan de acuerdo a su cobertura relativa del terreno. En la gráfica 8 se puede apreciar que el ajuste obtenido con nuestra distribución es muy bueno.

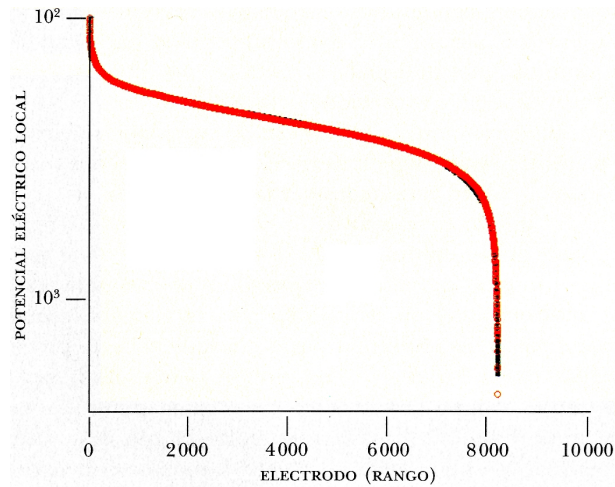


Gráfica 7: Nodos de la red regulatoria de *E. coli* ordenados según el número de enlaces de salida y su ajuste a la distribución beta generalizada.



Gráfica 8: Gráfica de las áreas cubiertas por diferentes especies de plantas en terrenos abandonados por 40 años en el estado de Illinois, ordenadas según su tamaño. La línea es el ajuste de la distribución beta generalizada.

Como ejemplo final de un sistema biológico, en la gráfica 9 presentamos los valores de la variación de voltaje registrado por medio de electrodos colocados en la corteza cerebral de un gato despierto, ordenados según su intensidad (Destexhe *et al.*, 1999). Un análisis preliminar de la actividad eléctrica en la corteza cerebral del gato cuando está en distintos estados de alerta muestra que, si se encuentra dor-



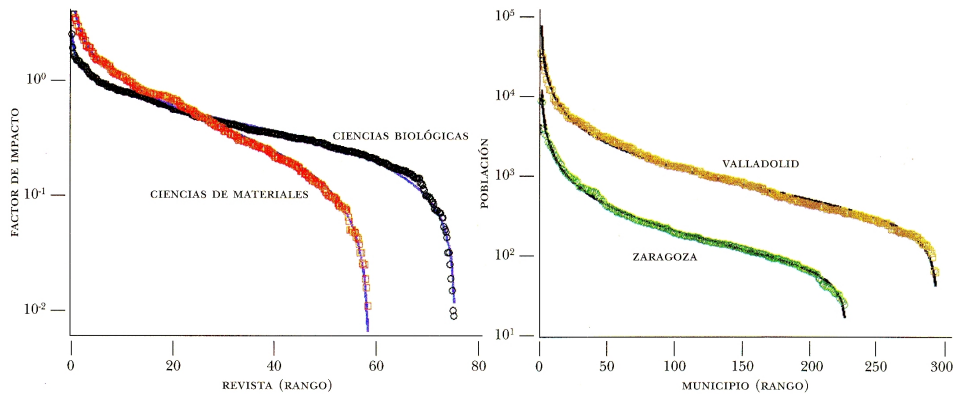
Gráfica 9: Medidas de variaciones de voltaje del cerebro de gato despierto ordenadas según su intensidad junto con su ajuste a la distribución beta generalizada.

mido en la etapa REM (*rapid eye movement*) los parámetros de la distribución toman valores semejantes a cuando está despierto. Al pasar a la etapa de SWS (*slow wave sleep*) estos valores cambian ligeramente, y cuando dentro de esta etapa se presentan estallidos de actividad (*bursts*) los exponentes difieren considerablemente. Un estudio sistemático de las variaciones de los parámetros en estas medidas electrofisiológicas pudiese proporcionar un medio de clasificación de los estados de alerta.

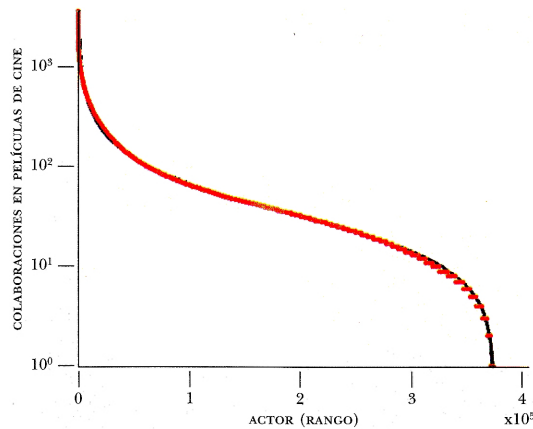
Sistemas sociales

Nuestra experiencia nos enfrenta día a día con la complejidad de los sistemas sociales. Los comportamientos que emergen de colectivos de sistemas vivos son sin lugar a dudas complejos. Por otra parte, en la muestra de ejemplos de índole social que hemos analizado, el ajuste a la distribución beta generalizada es realmente sorprendente. Esto hace pensar que dicha distribución proporciona una herramienta *ad hoc* para el estudio de la complejidad. A modo de ejemplo, empezamos por el comportamiento del índice de impacto en las revistas de investigación. Se trata de un problema de informática que involucra una gran cantidad de factores sociales, tecnológicos y económicos. La gráfica 10a compara factores de impacto de las revistas sobre ciencia de materiales y biociencias, al ordenarlas en forma decreciente, junto con el ajuste de nuestra forma funcional. Este comportamiento se presenta en todas las áreas de investigación analizadas (Mansilla *et al.*, 2007) a excepción de la medicina donde el ajuste es cuestionable.

Otro ejemplo de índole social, la gráfica 10b, se refiere a la distribución de ciudades en municipios de España, que se obtiene al colocar la ciudad más populosa en primer lugar con su población relativa y así sucesivamente con las demás or-



Gráfica 10: (a) Revistas especializadas del área de las ciencias de materiales ordenadas según su factor de impacto junto con su ajuste por medio de la distribución beta generalizada; determinación equivalente para el área de biociencias. (b) Distribución de las poblaciones de municipios de las provincias españolas de Zaragoza y Valladolid en orden decreciente con sus respectivos ajustes a la función beta generalizada.



Gráfica 11: Red de colaboraciones cinematográficas. La gráfica muestra los actores de cine ordenados en forma decreciente según el número de películas que comparten con otros actores. La curva es el ajuste de la distribución beta generalizada.

denadas en forma decreciente de acuerdo a su población. Este comportamiento se mantiene para casi todos los municipios de España con valores de exponentes (a, b) semejantes, una notable excepción es el municipio vasco de Guipúzcoa que sigue un decaimiento exponencial. Al considerar poblaciones de otros países los ajustes siguen siendo en general buenos con valores de (a, b) que pueden variar considerablemente (véase la tabla 1 más adelante), llegándose incluso a detectar comportamientos regionales, como es el caso de Europa.

Los ejemplos de la gráfica 10 muestran comportamientos resultantes de interrelaciones en redes informáticas, sociales, económicas, culturales, etc., que provienen de la convergencia de procesos de diversa naturaleza. En cambio, en la gráfica 11 nos referimos (al igual que en la gráfica 7) al comportamiento de una propiedad intrínseca de una red: su conectividad. Se trata de una red social que describe colaboraciones de actores en películas de cine. Los nodos son actores y los enlaces indican una participación compartida en una película (Barabási y Albert, 1999). El ajuste obtenido para la distribución de colaboraciones con la beta generalizada supera a todas las alternativas sugeridas hasta la fecha en la literatura. El análisis de la estructura topológica de redes complejas y de la dinámica operando sobre ella, ha mostrado ser de gran utilidad en el estudio presente de los sistemas complejos (Watts y Strogatz, 1998; Watts 1999; Albert y Barabási, 2002). La red integra a los elementos del sistema, y la dinámica (generalmente no lineal) aborda la evolución temporal. Muchas de las propiedades colectivas tales como leyes de potencias y comportamientos críticos emergen en forma natural con este tratamiento. La incorporación del espacio físico a este esquema es tema de investigación de mucha actualidad.

Resumen

A manera de resumen presentamos en la tabla 1 a continuación valores de los parámetros (a, b) y del cuadrado del coeficiente de correlación R^2 tanto de varios de los ejemplos anteriores como de algunos otros casos, resultantes del ajuste con la beta generalizada a distribuciones ordenadas por rango. Las fuentes de los datos presentados pueden consultarse en (Martínez-Mekler *et al.*, 2009).

Datos empíricos	a	b	R^2
Uso de letras en inglés	0.18	1.31	0.97
Uso de notas musicales en <i>El Messiah</i> de Haendel	0.56	1.46	0.98
Área de motivos geométricos en el cuadro <i>Aeroplano volando</i> de Malevich	1.10	0.57	0.98
Área de campos abandonados en ecosistemas de Illinois	0.88	0.76	0.98
Potencial eléctrico en la corteza cerebral de gato	0.08	0.24	0.97
Caídas abruptas en la bolsa de valores de Nueva York	3.56	0.11	0.98
Conectividad en la red regulatoria de <i>E. coli</i>	0.99	0.39	0.98
Colaboraciones entre actores en películas	0.71	0.61	0.99
Clasificación académica mundial de universidades	0.37	0.43	0.99
Factores de impacto de revistas de biociencias	0.59	0.83	0.99
Población por estados en México	0.44	0.68	0.99
Población por municipios en Zaragoza	0.95	0.54	0.99
Población por municipios en Valladolid	0.98	0.42	0.99
Población por provincias en China	0.14	0.98	0.99
Distancia carretera desde la ciudad de Guanajuato a las principales ciudades de México	1.52	3.87	0.99

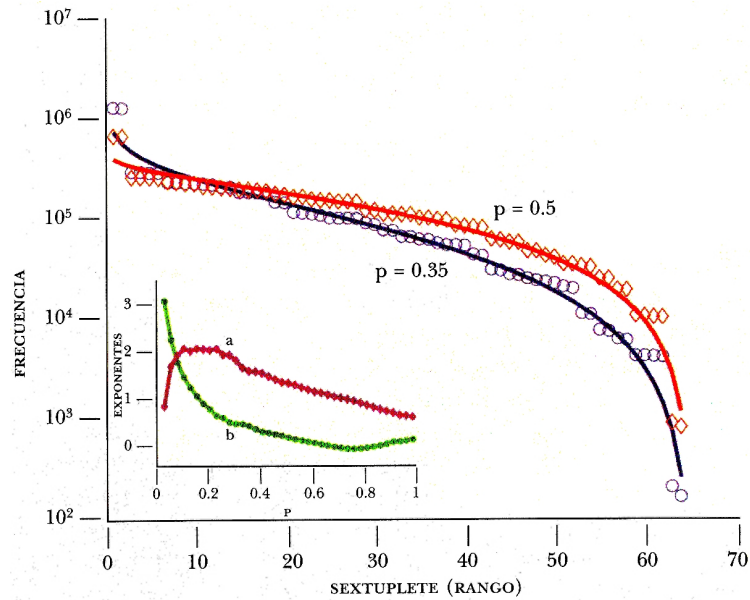
Tabla 1: Valores de los parámetros y cuadrado del coeficiente de correlación del ajuste de la distribución beta generalizada a varios datos empíricos.

MODELOS

El objetivo de la elaboración de modelos es lograr un mejor entendimiento del fenómeno bajo estudio, posibilitando en algunas ocasiones llevar a cabo predicciones sobre su comportamiento. En esta sección mencionamos dos tipos de modelos, en el primero generamos datos por medio de reglas de evolución temporal que incorporan algunos de los elementos observados en la fenomenología estudiada, y posteriormente corroboramos que nuestra propuesta funcional ajusta bien las distribuciones ordenadas por rango de esos datos. Puesto que las reglas de evolución dependen de parámetros relacionados con propiedades específicas del modelo, al observar cómo la variación de esos parámetros modifican los valores de los exponentes (a, b) de nuestro ajuste, podemos asociar un significado a esos exponentes. En la segunda clase de modelos se estudian versiones de ecuaciones de evolución utilizadas ampliamente para procesos probabilísticos que *ex profeso* presentan soluciones compatibles con la distribución beta generalizada. Esto se hace con el propósito de que las adecuaciones introducidas en las ecuaciones pongan de manifiesto alguna característica del fenómeno bajo estudio relevante para el buen ajuste. Esta segunda vertiente no la desarrollamos en este escrito porque rebasa los propósitos del mismo. Sin embargo, para el lector familiarizado con ecuaciones de procesos estocásticos se trata de variantes de ecuaciones maestras, de Langevin y de Fokker-Planck (Cocho *et al.*, 2009).

Sobre la primera opción de modelos, tomando en cuenta nuestro análisis previo de las secuencias genéticas, implementamos una dinámica de expansión-modificación (Li, 1991), en la cual convergen dos procesos, uno relacionado con el cambio y otro con la permanencia. El modelo incorpora elementos básicos de la evolución neutralista donde los principales mecanismos para el cambio de secuencias son duplicaciones y mutaciones puntuales. La realización más sencilla de este esquema es la booleana, donde: $i]$ se considera a un sistema que sólo puede tomar dos valores, por ejemplo 0 y 1; $ii]$ se inicia un proceso con un 1 o un 0 como semilla, haciendo que el 0 se convierta en 1 o el 1 en 0 con una probabilidad de modificación p (mutación puntual), y que el 0 pase a 00 o el 1 a 11 con una probabilidad de expansión $1 - p$ (duplicación), $iii]$ se genera una sucesión de ceros y unos por medio de la repetición del algoritmo precedente. Después de muchas iteraciones se analiza el comportamiento estadístico de eneadas de la sucesión (agrupación de n elementos consecutivos) ordenadas en orden decreciente según su frecuencia relativa de aparición. Finalmente se ajusta la distribución rango-frecuencia de eneadas a la función beta generalizada.

La gráfica 12 muestra esta distribución de n -adas para dos valores de la probabilidad de modificación p , así como su respectivo ajuste a nuestra forma funcional. En la inserción de la gráfica 12, los valores de los exponentes de ajuste a y b se grafican con respecto a p . Para valores bajos de p , sucede que $a > b$, las mutaciones puntuales son poco frecuentes y la expansión es dominante, dando lugar a intervalos extensos de ceros o unos; al incrementar p , a y b se encuentran eventualmente puesto que a disminuye y b aumenta. Por arriba de este valor umbral



Gráfica 12: Distribución rango-frecuencia de sextupletes de ceros y unos generados por el algoritmo de expansión-modificación descrito en el texto. Los círculos corresponden a datos generados con una probabilidad de modificación $p = 0.35$, los rombos con $p = 0.5$. Las curvas son ajustes a la distribución beta generalizada. La inserción muestra cómo cambian los valores (a, b) de los ajustes al variar la probabilidad de modificación p .

p_u , con $a < b$, el aumento en la probabilidad de mutaciones puntuales induce mayor desorden. Desde esta perspectiva, a se relaciona con la permanencia y b con el cambio. Eventualmente, para valores de p suficientemente elevados, los intervalos con alternancia de ceros y unos empiezan a ser dominantes causando una disminución en el grado de desorden y un descenso en el valor de b , el cual sin embargo continúa siendo mayor que a . Variantes de este modelo con probabilidades de mutación independientes de las de modificación, con factores de expansión mayores o con retardos en la implementación de mutaciones, dan todas lugar a sucesiones con buenos ajustes a la distribución beta generalizada (Álvarez *et al.*, 2009). Claro está, los valores umbrales varían con estos cambios e incluso pueden no presentarse.

Este patrón de comportamiento se observa también al considerar familias de reglas deterministas de evolución de variables continuas (en lugar de las booleanas) definidas para tiempos discretos conocidas como mapeos o mapas, donde la permanencia se asocia a regímenes regulares (laminares) y el cambio está ligado a dinámicas caóticas (turbulentas). Tanto para los modelos discretos del párrafo anterior como para los mapeos se puede demostrar que cuando $a = b$ ocurre una transición orden-desorden. En los primeros esta transición coincide con la desinte-

gración de regiones con invarianza de escala, esto es, de regímenes que preservan su comportamiento ante cambios del grano de resolución de su observación (Li, 1991); para los segundos, la transición señala el inicio de comportamientos con máxima entropía (una medida del grado de desorden).

DISCUSIÓN

Hemos puesto de manifiesto una universalidad en el comportamiento estadístico de distribuciones ordenadas por rango en las ciencias y en las artes, que puede describirse por una forma funcional con dos parámetros ajustables. Este tipo de distribuciones ordenadas por rango ha sido ampliamente estudiado en años recientes para redes complejas, y por lo general se argumenta que siguen una ley de potencia. Sin embargo, salvo algunos casos excepcionales, los ajustes con leyes de potencia son adecuados sólo para valores intermedios del rango. Nuestra distribución, en cambio, produce buenos ajustes para todos los valores del rango. No está por demás señalar que la generalización de la distribución beta que empleamos incluye el comportamiento de una ley de potencia en el caso límite en que alguno de sus exponentes sea cero. El mensaje central de nuestro trabajo es que, independientemente de la presencia de una ley de potencia, hemos encontrado un comportamiento genérico previamente no identificado.

Dinámicas en conflicto

Con relación al significado de los parámetros de la distribución beta generalizada, en algunas instancias el exponente a puede relacionarse con comportamientos que generan leyes de potencia, como es el caso de la invarianza de escala en flujos turbulentos en el llamado rango inercial, donde la transferencia de energía entre escalas vecinas se lleva a cabo con la misma tasa. En cambio, el parámetro b se asocia con fluctuaciones caóticas, desordenadas; que para la turbulencia corresponden al llamado rango disipativo (Frisch, 1995). La distribución beta generalizada logra integrar ambos regímenes, así como la transición entre ellos. Una mayor comprensión de los exponentes proviene de nuestro estudio de un modelo de expansión-modificación donde una dinámica en conflicto da lugar a la distribución. La componente de expansión que favorece la preservación de un comportamiento sistemático de crecimiento se encuentra asociada a la a , mientras que la parte de modificación que favorece el cambio y desorden se relaciona con b . Para algunos mapeos referidos anteriormente se da una dinámica intermitente, que recoge la alternancia entre comportamientos regulares expansivos que en un símil hidrodinámico corresponde a flujos laminares y comportamientos desordenados, turbulentos bajo el mismo símil. Cabe mencionar que aunque hemos mostrado que procesos con dinámicas en conflicto, tipo permanencia-cambio, pueden producir distribuciones beta generalizadas, aún no estamos en la posición de considerar esta característica como un requisito.

Multifactorialidad, heterogeneidad, escalas múltiples, constricciones y correlaciones

Nuestros resultados son más reveladores cuando ambos parámetros a y b toman valores que son comparables y que no son despreciables (o sea, que no son valores cercanos a cero). Esto ocurre con frecuencia en los fenómenos sociales que hemos explorado y que dan lugar a ajustes sorprendentes. En virtud de estas observaciones, parece ser que los ajustes de la distribución beta generalizada son particularmente adecuados al tratar con situaciones provenientes de la convergencia de múltiples procesos heterogéneos, tal como ocurre con los sistemas sociales. Lo más probable es que estos procesos se encuentren débilmente correlacionados, por ejemplo, como resultado de constricciones al sistema, en ocasiones asociadas a su tamaño finito. Estas consideraciones son consistentes con el comportamiento de los varios tipos de vegetación en los campos abandonados a que hicimos referencia (Bazzaz, 1975), pues resulta que si se considera por separado el comportamiento estadístico de cada tipo de vegetación el ajuste con la distribución beta generalizada es menos convincente que cuando se integran todos los tipos. Algo parecido ocurre al estudiar el comportamiento rango-frecuencia de las notas musicales. Al analizar la pieza "Sevilla" de la suite *Iberia* de Albeniz, sucede que el ajuste con la distribución beta generalizada mejora a medida que se van integrando más octavas en el análisis (Beltrán *et al.*, 2009). En ambos casos se presenta la convergencia de varios procesos ligeramente diferenciados que se van correlacionando débilmente al establecerse constricciones en la forma de competencia por recursos y espacios finitos. En el caso del arte, la finitud espacial entra en juego como una restricción. Todo lo anterior plantea la pertinencia de tomar en cuenta consideraciones sobre dinámicas en conflicto, permanencia y cambio, multifactorialidad y efecto de constricciones con sus subsecuentes correlaciones, en el análisis de fenómenos complejos y procesos creativos. Adicionalmente cabe mencionar, aunque sea sin su debida discusión, que hemos detectado que la confluencia de comportamientos a diferentes escalas, así como la presencia de procesos multiplicativos de varios elementos (multinomios), parecen ser factores relevantes para un mayor entendimiento de nuestras observaciones (Naumis y Cocho, 2008).

Clasificación

Aparte de los ejemplos previamente expuestos de clasificar por medio de los parámetros de la distribución beta generalizada al considerar diversos géneros musicales, escalas mayores y menores en la música, y estados de alerta en la neurofisiología de gatos, hemos percibido algunas regularidades en el comportamiento de las relaciones entre a y b según sea el tipo de sistema que se esté considerando. Por ejemplo, para el caso de datos secuenciales tales como las frecuencia de uso de las notas musicales, de los codones en genes, de letras en distintos idiomas, sucede que en general $a < b$, mientras que para situaciones relacionadas con propiedades intrínsecas de redes, como por ejemplo su conectividad, $a > b$ es más común. Otra observación se refiere a las distribuciones de poblaciones. En los casos ana-

lizados de Europa hemos encontrado que $a > b$, mientras que en países con otro desarrollo histórico como es el caso de México y de China, $a < b$; curiosamente para la India nuestro ajuste no es bueno. Aunque por este tipo de consideraciones los exponentes a y b parecen ser elementos promisorios para plantear clasificaciones, su potencial para establecer clases de universalidad tal como ocurre con los exponentes críticos (Kadanoff, 2000), es aún tema futuro de investigación.

Perspectiva

La ubicuidad con que se presenta el comportamiento que hemos expuesto sugiere que debería haber una explicación subyacente de carácter estadístico. Trabajo en este sentido ha mostrado que las funciones de densidad de probabilidad suaves con un solo máximo, que son las de uso más común (incluyen la normal o gaussiana), generan probabilidades acumuladas,¹ que al ser invertidas dan lugar a distribuciones ordenadas por rango (las que estamos estudiando) que geométricamente tienen una forma sigmoide (como la parte central de una s). Por otro lado, la forma funcional que proponemos cuenta con los elementos para lograr excelentes ajustes a sigmoides. Por ello no es de extrañarse que hayamos obtenido resultados tan buenos y en tal variedad de situaciones. Claro está que los valores de los parámetros (a, b) dependen de la densidad de probabilidad que se esté considerando. Vienen entonces a la mente preguntas como: ¿por qué en los fenómenos sociales que hemos analizado, a y b guardan relaciones entre sí que parecen no ser accesibles a partir de una densidad de probabilidad gaussiana? Sabemos que la gaussiana es tan socorrida porque satisface un teorema de límite central, que *grosso modo* nos dice que la suma de variables azarosas, estadísticamente independientes, distribuidas idénticamente, es una variable azarosa con una densidad de probabilidad que converge a la distribución gaussiana. ¿Será que para el caso de los sistemas sociales, con su complejidad inherente, exista una extensión o reformulación del teorema de límite central? La pertinencia de este tipo de búsqueda queda de manifiesto en la reflexión del eminente matemático ruso Andrei Nikolaevich Kolmogorov: “De hecho, todo el valor epistemológico de la teoría de la probabilidad se basa en que fenómenos azarosos presentes a grandes escalas crean en su comportamiento colectivo una estricta regularidad no azarosa” (Gnedenko y Kolmogorov, 1954); o en lenguaje cotidiano: “Nada hay tan determinista como un tambache de procesos azarosos, desordenados”.

¹ Leyes de potencias en las probabilidades acumuladas frecuentemente son referidas como leyes de Pareto.

A lo largo de este escrito nos hemos centrado en cotos “naturales” para los fenómenos complejos, tales como la biología y la sociología. ¿Qué podemos decir de las ciencias exactas como la física y la astronomía?

Con relación a la física, algo hemos mencionado sobre fenómenos en que están presentes interacciones heterogéneas, como la turbulencia hidrodinámica, así como el caso de los fenómenos críticos en que se tienen correlaciones a todas las escalas. En lo referente a la astronomía y cosmología, el universo presenta una estructura fractal con dimensión efectiva alrededor de dos (Joyce *et al.*, 2005). Además, en presencia de desorden puede reducirse la dimensión dinámica efectiva del sistema (Parisi y Sourlas, 1979). Tendríamos entonces que la materia y el desorden no sólo curvan el espacio, cambian su métrica, sino que pueden modificar la dimensión efectiva de éste. Si además tomamos en cuenta que los potenciales eléctricos y gravitacionales pueden formularse en términos de caminatas aleatorias (Hersh y Griego, 1969), vemos que la importancia del “azar creador” queda de manifiesto tanto en la física como en la biología, donde opera la selección natural de Darwin. En este ámbito, consideraciones probabilísticas como las aquí presentadas pueden contribuir a nuestro conocimiento sobre fundamentos de la ciencia.

Por otra parte, hay evidencia de que las redes asociadas a la dinámica regulatoria biológica están en “zona crítica”² y que como sugiere el Premio Nobel de Física 1998, Robert Laughlin, quizá pasa lo mismo para la dinámica cuántica (Laughlin *et al.*, 2001). Bajo esta perspectiva, en ambos casos *las leyes que gobiernan las dinámicas física y biológica serían fenómenos emergentes* pertenecientes a clases de universalidad como las mencionadas anteriormente, que se podrían estudiar con las técnicas del grupo de renormalización. Tipos diferentes de dinámicas físicas corresponderían a una misma “realidad crítica”.

Vemos, pues, que se están dando cambios fundamentales en la concepción del mundo, lo que sugiere una revolución científica semejante a la que tuvo lugar a partir del Renacimiento y quizá en esta ocasión sí se generen cambios profundos en la dinámica social humana encaminados a solventar con justicia la crisis generalizada actual.

² Véase el trabajo de Maximino Aldana, “Criticalidad, robustez y evolución de redes genéticas” en: Flores Valdés, J. y Martínez Mekler, G. (eds.), 2009. *Encuentros con la complejidad*. México: UNAM / Siglo XXI, pp. 150-177.

BIBLIOGRAFÍA

- Albert, R., Barabási, A-L. (2002) "Statistical mechanics of complex networks", *Rev. Mod. Phys.*, vol. 74, pp. 47-97.
- Álvarez Martínez, R., Martínez-Mekler, G., Cocho, G. (2009), "Conflicting dynamics leading to rank-ordered generalized beta distributions", por publicar, México, UNAM.
- Barabási, A-L., Albert, R. (1999), "Emergence of scaling in random networks", *Science*, vol. 286, pp. 509-512.
- Bazzaz, F. A. (1975), "Plant species diversity in old-field successional ecosystems in Southern Illinois", *Ecology*, vol. 56, pp. 485-488.
- Beltrán del Río, M., Cocho, G., Naumis, G. G. (2008), "Universality in the tail of musical note rank distribution", *Physica A*, vol. 387, pp. 5552-60.
- Beltrán del Río, M., Cocho, G. (2009) "Rank-size distribution of notes in harmonic music: shuffling of distributions", *Complex 2009 Proceedings*, en prensa, Springer-Verlag.
- Bury, K. (1999), *Statistical Distributions in Engineering*, Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Cocho, G., Martínez-Mekler, G., Rodríguez R. (2009), "Master equations leading to stationary beta distributions", por publicar, UNAM, Mexico.
- Destexhe, A., Contreras, D., Steriade, M. (1999), "Spatiotemporal analysis of local field potentials and unit discharges in cat cerebral cortex during natural wake and sleep state", *Journal of Neuroscience*, vol. 19, pp. 4595-4608.
- Ferrer i Cancho, F., Sole, R. (2001), "Two regimes in the frequency of words and the origins of complex lexicons: Zipf's Law revisited", *Quantitative Linguistics*, vol 8, pp. 165-173.
- Frisch, U. (1995), *Turbulence, the legacy of A. N. Kolmogorov*, Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Gnedenko, B. V., Kolmogorov, A. N. (1954), *Limit distribution: for sum of independent variables*, Reading, MA, Addison Wesley.
- Hersh, R., Griego, R. J. (1969), "Brownian motion and potential theory", *Scientific American*, vol. 220, pp. 67-74.
- Joyce, M., Sylos Labini, F., Gabrielli, A., Montuori, Pietronero, L. (2005), "Basic properties of galaxy clustering in the light of recent results from the Sloan Digital Sky Survey", *Astronomy and Astrophysics*, vol. 443, pp. 11-16.
- Kadanoff, L. P. (2000), *Statistical physics: statics, dynamics and renormalization*, Singapore, World Scientific Publishing, Singapore.
- Laughlin, R. B., Lonzarich, G. G., Monthoux, P., Pines, D. (2001), "The quantum criticality conundrum", *Advances in Physics*, vol. 50, p. 361.
- Li, W. (1991), "Expansion-modification Systems: A model for Spatial $1/f$ Spectra", *Phys. Rev. A.*, vol. 43, pp. 5240-5260.
- Mansilla, R., Köppen, E., Cocho, G., Miramontes, P. (2007), "On the behavior of journal impact factor rank-order distribution", *Journal of Informetrics*, vol. 1, pp. 155-160.
- Martínez Mekler, G. (1993), "Dinámica y estructura de sistemas complejos", *Temas selectos de física estadística*, L. García-Colín, F. Ramos Gómez, R. Rechtman (coords.), El Colegio Nacional, México, pp. 141-227.
- Martínez Mekler, G., Cocho, G. (1998), "Al borde del milenio: caos, crisis y complejidad". *Ciencias de la materia. Génesis y evolución de sus conceptos fundamentales*, L. de la Peña (compilador), México, Siglo XXI Editores.

- Martínez Mekler, G. (2000), "Una aproximación a los sistemas complejos", *Ciencias Revista de Difusión*, México, Facultad de Ciencias, UNAM.
- Martínez-Mekler, G., Álvarez Martínez, R., Beltrán del Río, M., Mansilla, R., Miramontes, P., Cocho, G. (2009), "Universality of rank-ordering distributions in the arts and sciences", *PLoS ONE*, vol. 4, num. 3, c4791.
- Naumis, G. G., Cocho, G. (2008), "Tail universalities in rank distributions as an algebraic problem: the beta-like function", *Physica A*, vol. 387, pp. 84–96.
- Parisi, G., Sourlas, N. (1979), "Random magnetic fields, supersymmetry and negative dimensions", *Physical Review Letters*, vol. 43, p. 744.
- Sánchez Pialas, L. E. (2007), "Implantación de la ley de Zipf para el análisis visual de proyectos arquitectónicas", Tesis doctoral, Facultad de Arquitectura, UNAM.
- Stanley, H. E. (1971), *Introduction to phase transitions and critical phenomena*, Oxford, Oxford University Press.
- Waddington, C. H. (1977), *Tools for Thought*, Londres, Jonathan Cape.
- Watts, D. J., Strogatz, H. (1998), "Collective dynamics of 'small-world' networks", *Nature*, vol. 393, pp. 440–442.
- Watts, D. J. (1999), *Small worlds: the dynamics of networks between order and randomness*, Princeton, NJ, Princeton University Press.
- Wilson, K. (1979), "Problems in physics with many scales of length", *Scientific American*, vol. 241, p. 158.
- Zipf, G. K. (1949), *Human behavior and the principle of least effort*, Cambridge, MA, Addison-Wesley Press.

COMPLEJIDAD, CRITICALIDAD Y HUMANISMO CREATIVO *

V OY a hablar de algunos aspectos de la física de la complejidad y de los fenómenos críticos y, por decir así, de las implicaciones que por analogía se pueden extraer para entender a los organismos biológicos, así como de las que nos podrían dar sugerencias a nivel de organización social.

COMPLEJIDAD

Distingamos primero a los sistemas simples con pocos elementos; son los sistemas típicos de la mecánica. Quizá el más viejo y hasta cierto punto el más característico es el sistema solar. Sabemos que si tenemos el Sol y un planeta, que puede ser la Tierra, hablamos del problema de dos cuerpos; la ley de interacción es la gravitación universal de Newton, que dice que la fuerza atractiva es proporcional al producto de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa y podemos entender lo que pasa ahí: las mareas, las estaciones y cosas de ese tipo. Esos son los sistemas, diríamos, reduccionistas y la ciencia más característica es la mecánica.

Sin embargo, dentro de la física la cosa no se quedó ahí, después regresaremos a esto, pero por ahora hay que decir que alrededor de 1800 Sadi Carnot inventa la termodinámica, con todas las comillas que queramos. ¿De qué se trata esto? Pensemos en el gas que tenemos en este auditorio, tenemos muchas moléculas aunque no de muchas clases; habrá oxígeno, nitrógeno, helio y smog o carbón, lo que sea, pero el número de moléculas será grande, algo así como 10^{25} , y entonces tendríamos que escribir igual número de ecuaciones de movimiento tipo Newton y resolverlas. ¡No hay quien lo haga ni a quien se le ocurra! Sin embargo, es un hecho que podemos decir cosas de características promedio, características emergentes, ya que tenemos la termodinámica y podemos tomar como variables la presión, el volumen (que es el volumen del auditorio) y la temperatura; además, para gases diluidos hay una ecuación muy sencilla que dice que la presión por el volumen es proporcional a la cantidad de gas por la temperatura.

$$pV = nkT$$

* Texto basado en la transcripción de la conferencia, del mismo título, que tuvo lugar el 6 de diciembre de 2011 en la Facultad de Ciencias, UNAM. Publicado en: Vizcaya, E., Pacheco, L. y Miramontes, O. (eds.), 2013. *Ciencia y Sociedad: Pinceladas*. México: CopIt-arXives.

Entonces tenemos ahí una sencillez que es, diríamos, emergente, que tiene que ver con grados colectivos y que realmente es muy vieja; que se refiere a sistemas con muchos elementos, pero con interacciones sencillas. Diríamos que la distinción entre mecánica y termodinámica es muy parecida a la problemática actual, planteada como reduccionismo vs. holismo, emergencia. Como que se percibe que es la segunda vuelta de una espiral.

Vayamos ahora a los sistemas complejos. Éstos se caracterizan, entre otras cosas, por ser heterogéneos, tanto en los componentes como en las interacciones entre ellos. En el caso del gas y la termodinámica, eran pocos componentes diferentes y en una primera aproximación sólo interaccionaban cuando había choques, pero en los sistemas complejos, por ser heterogéneos, lo que va a pasar es que si queremos definir alguna característica óptima, tendremos complicaciones. La característica a optimizar sería, por ejemplo, la menor energía; en sistemas biológicos o sociales podría hablarse de eficiencia o algo así. La complicación surge del hecho de que en un sistema mecánico o termodinámico hay sólo una solución que es la mejor en algún sentido, pero en los sistemas que son heterogéneos, en elementos y en complejidad, lo que sucede es que hay un número grande de soluciones cuasiequivalentes. No hay uno solo que sea el mejor, sino que hay varios que tienen algo en común, por eso son lo que llamaríamos cuasióptimos, pero cada uno es diferente. Es decir, una propiedad básica de los sistemas complejos es la emergencia de colectivos con propiedades genéricas (i. e., que todos son cuasiequivalentes), pero que exhiben diversidad individual. Dicho de otro modo, el que los sistemas complejos cuenten con muchos óptimos cuasiequivalentes es la base de la diversidad.

Relacionado con esto último tenemos el problema de la predestinación y el libre albedrío que me parece se ha planteado desde los tiempos de Jesucristo. Y tomando prestada una frase de Ricardo Mansilla, podemos decir que: “el libre albedrío es individual pero la predestinación es colectiva”. Para ejemplificar, pensemos en una manifestación social que salga de la UNAM. Resulta que cada estudiante y cada profesor es diferente, pero se puede conjeturar que una de las consignas sea del tipo: “Dame la U, dame la N”, etc., y corear: “¡UNAM, UNAM!” Quiere decir que propiedades colectivas son predecibles, aunque las propiedades individuales sean diferentes.

Adelantándonos un poco, si a nivel social tenemos un sistema complejo y queremos optimizar completamente una de las características vamos a tener problemas, porque lo característico de estos sistemas es que si optimizamos una cosa se nos estropea la otra; y para que eso no ocurra tenemos que buscar un cierto equilibrio entre las variables a optimizar. Un ejemplo de estos problemas se da en el sistema capitalista, donde sólo se maximiza la producción, y produce pobres, gradientes sociales terribles, ¡produce lo que produce! Quiere decir que, en cierto sentido, el fundamentalismo en sistemas complejos, llamémoslo mecanicista pero en general fundamentalismo, es un riesgo, porque si dices: “esta característica es la buena” y la optimizas se va a pagar el precio respecto a las otras, y muchas veces el precio es grande.

GENERICIDAD Y ESPECIFICIDAD

Conviene ahora mencionar un par de analogías y una anécdota.

En el cerebro se ha visto que hay neuronas, y que están conectadas con otras, hay transmisores químicos y lo que se ve es que dada una salida para un movimiento o una salida para un cúmulo de neuronas, hay muchos patrones bioquímicos de retardo de transmisión sináptica que son equivalentes. Quiere decir que el sistema nervioso central trabaja con módulos cuasiequivalentes, y es lo que permite que cuando tengo que recordar algo nuevo sólo haya que modular estas cosas cuasiequivalentes. Entonces, se tiene que esta característica de cuasiequivalencia de módulos es básica en el cerebro, y de hecho, es básica como propiedad de los organismos biológicos.

La segunda analogía tiene que ver con la medicina, sus internados y residencias. Por un lado, el cuerpo humano y sus enfermedades constituyen un sistema complejo y eso va a implicar que va a haber cosas genéricas, y por ello las enfermedades se clasifican en grandes áreas. Pero, por otro lado, luego nos topamos con variantes muy específicas, y por eso a veces se dice que no hay enfermedades sino enfermos. Eso es lo que explica que mientras que puede haber matemáticos que a los veinte años hicieron algo revolucionario, médicos de la misma edad así de geniales no los hay; no les basta la carrera y tienen que hacer un internado, una residencia, ¿por qué?, porque necesitan dominar la variedad. No se vale decir: “bueno, me hago cargo de este enfermo, pero como no se porta como me lo enseñaron en el libro, pues para fuera”. Así, es un hecho que esta variedad que hay, asociada a la heterogeneidad de los sistemas complejos, no se va a aprender en una universidad, sino que, en general, uno la aprende en la universidad de la vida.

La anécdota es sobre Leo Kadanoff, quien es un físico teórico muy matemático, de la Universidad de Chicago; él es un cuasi-Nobel, y de hecho, estaba en un grupito de cuatro candidatos, pero como el Premio Nobel se lo pueden dar a tres, entonces la comisión sueca se lo dio al mejorcito, a Kenneth G. Wilson.¹ En aquella época se decía que uno se sacó el Premio Nobel y tres lo perdieron. Con esto quiero decir que Kadanoff es un físico-matemático de primera línea.

En el Instituto de Física hay la costumbre, que a veces se cumple, de organizar mensualmente un coloquio, con la idea de traer premios Nobel o alguien de muy buen nivel, siempre que sea buen expositor, y si no, de lo que haya a la mano, de nuevo, siempre que sea buen expositor, porque hay gente que será buena haciendo ciencia pero que en una charla son una peste. Resulta que una vez llegó Leo Kadanoff para estar en el coloquio y su plática se titulaba: “La mecánica de fluidos y los cuentos de mi abuelita”, y todos nos quedamos a oír, intrigados y curiosos por lo que diría, porque hay físicos que son buenos y son poetas, pero éste no, éste tenía fama de ser demasiado matemático.

Él dijo más o menos lo siguiente: Miren, en la mecánica de fluidos hay una ecuación, la de Navier-Stokes, una ecuación a derivadas parciales y con un término

¹ Wilson, K. G. (1983). “The renormalization group and critical phenomena”, *Reviews of Modern Physics* 55: 583–600.

no-lineal chiquitito: velocidad por la derivada de la velocidad, que uno diría que casi es cero, y por tanto despreciable. Resulta que en cuanto estamos en tres dimensiones no podemos predecir casi nada y mi abuelita dice: “veo las nubes, me duele el talón, entonces va a llover y va a granizar”. Así, lo que él estaba diciendo –no exactamente con estas palabras– equivale a que la educación del físico es un poco deformarle la cabeza para que vea básicamente la masa, la posición, la velocidad, la aceleración, y “lo demás es un ruido que podemos olvidar y que no le toca a los físicos”, y ahora lo que está pasando es que eso no es suficiente. Necesitamos más conceptos y esos no los vamos a aprender en la universidad, los vamos a aprender viendo a literatos, al vulgo; lo que no quiere decir ignorantes, sino que vulgo quiere decir no físicos. Entonces, se debería tener una mentalidad abierta porque las categorías que durante siglos han sido suficientes ya no lo son.

En cierto sentido, él estaba diciendo algo parecido a lo que venimos comentando anteriormente, o sea, que hay cosas genéricas que han sido tratadas con categorías como velocidad, posición, etc., pero que en este momento se va a tener que ampliar lo que es la física y ahí hay que salirse de la cosa usual y ver lo que hay afuera. Entonces, habría que tender puentes con otros conocimientos, incluyendo los del “vulgo”. Pongo vulgo entre comillas porque para un físico un filósofo es vulgo, y una cocinera también, y a lo mejor tienen recetas de experimentos que hacen, que le sirven; por tanto, hay que saber escuchar, saber qué más tienen.

Un primer punto a resaltar de todo lo que hemos dicho, es que los organismos biológicos, los organismos sociales, y muchos de los fenómenos físicos que se nos presentan ahora, son fenómenos complejos y que éstos implican una doble cosa: que va a haber leyes genéricas muy amplias, pero que vamos a tener especificidades. Por ello se dice que cada cabeza es un mundo, y si hacemos un experimento nos sale una cosa, y si lo volvemos a hacer no sale exactamente lo mismo.

Les contaré otra anécdota, ahora un poco más personal. Cuando yo estudiaba el doctorado en Princeton, por allá en los años sesenta, había discusiones fuertes sobre si el tabaco hacía mal o no. Nosotros, como estudiantes graduados, veíamos la evidencia y decíamos: “claro que hace mal”. Las compañías de tabaco aguantaron decenios justamente por la no repetitividad de estos fenómenos complejos, porque los resultados de un experimento no coincidían con los de otros y con eso peleaban. Por tanto, hay que entender que la no repetitividad de los sistemas complejos puede ser base del forcejeo que existe en otros debates, por ejemplo, en torno al cambio climático. Es decir, hay que tenerlo en mente para poder elaborar respuestas adecuadas.

CRITICALIDAD

Hay una cosa adicional de los sistemas biológicos y, de hecho, de una buena organización social: que están en punto crítico.

Hablaré de agua, vapor, imanes, pero en general uno puede hablar de toda una clase de fenómenos en los que hay dos cantidades, dos fuerzas, que están en equilibrio, pero no en equilibrio estático sino dinámico, y que si gana una aparece un

cambio cualitativo, y entonces tenemos una situación de fácil regulación. En el caso del agua el cambio cualitativo sería la condensación, y tendríamos un líquido; si gana la otra fuerza, pasaríamos a gas, a vapor. En medicina se habla de homeostasis porque basta una señal pequeña para tener un cambio grande y con poca energía. En el caso de un problema social complejo lo que quisiéramos encontrar es la característica culpable, esa que si le ponemos el dedo y lo movemos un poco pues cambiamos a una estructura más justa, algo análogo a lo que pasa con los fenómenos físicos.

A este conjunto de cosas se le conoce como fenómenos críticos y transiciones de fase,² y para describirlos se habla de parámetros de orden y de parámetros de control. Por ejemplo, estando a nivel del mar, cuando el agua se transforma en vapor a 100 °C, el parámetro de orden es la cantidad de agua o la cantidad de vapor de nuestro sistema; y el parámetro de control es la temperatura. Entonces, en lo que serían cambios de fase o fenómenos críticos generalizados, como digo, hay dos fuerzas contrarias, y hay que ver cuál es la cantidad importante asociada a éstas, lo que determinará el parámetro de orden, y también habrá que precisar cuál es el parámetro de control.

Continuando con el ejemplo del cambio de fase agua-vapor, a nivel del mar, si nos acercamos a 100 °C pasamos de tener sólo agua a tener agua con pequeñas burbujas de vapor; luego, en la temperatura crítica de 100 °C se tiene una mezcla fractal, es decir, se tienen gotas grandes en cuyo interior hay burbujas medianas, y dentro de las burbujas medianas hay gotas chiquitas, dentro de las gotas chiquitas hay otra vez burbujas, de modo que si nosotros tomásemos una fotografía con zoom y otra con una ampliación 10 veces mayor se verían muy parecidas. Cuando superamos ya los 100 °C, se tiene vapor con algunas gotitas de líquido, y luego desaparecen estas gotitas de líquido y se tiene sólo vapor. Lo que quiere decir es que en el punto crítico, en la curva de transición, en que están empatando la cohesión entre las moléculas de agua (lo que en física llamamos energía interna) con la agitación térmica, se tiene una mezcla de fases. Así, podemos hablar de fluctuaciones retrógradas y anterógradas; si inicialmente estamos en líquido, y ponemos la flecha del tiempo conforme vamos calentando, habrá fluctuaciones anterógradas porque hay burbujitas de vapor que parecen anticipar la otra fase. En cierto sentido, si somos muy abusados, antes de los 100 °C diríamos: “aquí hay una fase que es vapor sin haber llegado a ella”. Y al revés, cuando ya estamos en la fase de vapor hay fluctuaciones retrógradas, porque se observan algunas gotitas de líquido, que corresponden a la fase anterior.

En el ferromagnetismo tenemos una cosa parecida. Si a un imán de hierro se lo calienta entonces disminuye la imantación, y cuando pasa una cierta temperatura, que se conoce como temperatura de Curie (en honor a Pierre Curie), se desimanta. Tenemos un sistema diferente, la transición no es de agua a vapor, es de imantado a no imantado. Pero si nosotros igualamos matemáticamente la imantación al tanto

² Solé, R. V., Manrubia, S. C. (1994). *Orden y caos en sistemas complejos*. España: Universitat Politècnica de Catalunya. Ver los capítulos sobre fenómenos críticos (cap. 7) y de sistemas críticos autoorganizados (cap. 8).

por ciento de gotas de agua, en la zona crítica las ecuaciones son idénticas. Quiere decir que para muchos fenómenos, muchas estructuras físicas que son diferentes (como el agua y el imán), y que pueden ser también biológico-físicas, las leyes físicas, las leyes que nos permiten decir cosas, son idénticas una vez que se establece un paralelismo.

Además, hay otro aspecto interesante. En el punto crítico se tienen clases cuasiequivalentes y se puede ver que las características importantes sólo dependen de las simetrías externas y del tipo de parámetro de orden asociado. Las simetrías externas tienen que ver esencialmente con las dimensiones del espacio; así, un imán está en 3 dimensiones, pero podemos tener una laminita de hierro, que está en 2, y un alambrito en una. Por otro lado, los parámetros de orden pueden ser escalares (p. e., la densidad de las gotas de agua), vectores, tensores y cosas así. Dicho de otra manera: las dinámicas microscópicas pueden ser muy diferentes, pero en el punto crítico sólo dependen de las dimensiones del espacio y de las características genéricas del parámetro de orden. Entonces, en el punto crítico es más fácil regular y ahí muchos fenómenos tienen un parecido grande. Así, uno podría especular que la vida biológica,³ que está en punto crítico en muchos niveles, implica que la vida artificial es quizá, relativamente sencilla, cosa que comentaremos después.

El ensayo *Entre el cristal y el humo*,⁴ del franco-israelí Henri Atlan, plantea una metáfora muy interesante; está diciendo que la vida está entre lo ordenado, que es el cristal, y el desorden, el humo, en esa zona que permite que haya regulación. Se puede ver que las proteínas, los ácidos nucleicos y las redes genéticas están en zona crítica, o sea, que están en una zona en donde es fácil la homeostasis, la regulación. Por otro lado, las enzimas cumplen su función dado que son blandas, sirven para pegar cosas, acercar reactivos, se deforman, y todo eso incrementa el ritmo al que se dan las reacciones químicas; si las enzimas fuesen duras, no habría esta facilidad que tienen los organismos vivos de tener reacciones, pues para que funcionasen sin enzimas tendrían que hacerlo a temperaturas muy altas. Es decir, lo que hacen las enzimas, a fin de cuentas, depende de estar entre el cristal y el humo. Y decíamos además que en el sistema nervioso central, en el cerebro, en distintos niveles se está en zona crítica, y que ello es lo que permite la regulación, el aprendizaje y todo un conjunto de cosas.

Resumiendo un poco, podemos decir que los organismos vivos tienen propiedades genéricas, como complejidad, criticalidad, homoquiralidad (que todos sean dextrógiros o levógiros), robustez y modularidad, pero claro, surge la pregunta de si habrá otras. El caso es que no lo tenemos claro, no sabemos. Y, si tuviésemos claras esas cuatro o cinco cosas, quizás la vida artificial estaría relativamente cerca y sería sencilla; lo que no sería sencillo sería repetir el proceso que dio lugar a una *Escherichia coli*, a un árbol o a un perro. Pero hay bastantes científicos que son optimistas de esto; yo soy uno de ellos y creo que la vida artificial está a la vuelta de

³ Se recomiendan los trabajos de Tom Ray sobre vida no biológica, por ejemplo, "Jugué a ser Dios y creé la vida en mi computadora", y visitar su sitio web: <http://life.ou.edu/>

⁴ Atlan, H. (1990). *Entre el cristal y el humo: ensayo sobre la organización de lo vivo*. Trad. del francés por Manuel Serrat Crespo. Madrid: Debate.

la esquina, con los riesgos que representa, dado el tipo de sociedades que tenemos en este planeta.

Ahora bien, ya de lleno en esa labor del pensamiento analógico, tendríamos una frase, casi eslogan, en la que se podría abundar: “Un organismo biológico o una organización social robusta, adaptable y creativa, debe ser compleja y estar en zona crítica”. Conviene decir que la robustez se refiere a que soporte los cambios externos relativamente fuertes, y lo creativo, a que no sólo se adapte sino que invente.

Así pues, si vemos la sociedad actual, concluimos que es compleja, pero los poderes dominantes sólo buscan una cosa, que es maximizar la producción y, de hecho, maximizar el dinero que ellos tienen. Y bueno, cuando hay cosas que están acopladas y maximizas una, pues le sueles dar en la torre a las demás y a los demás. Entonces, hay que tener en mente que el fundamentalismo es mal negocio, en este caso se traduce en producción y dinero, pero si se sustituye por otro fundamentalismo se corre el riesgo de meter la pata en algún punto.

CRISIS DE LA RAZÓN

En el momento actual la gente habla de posmodernismo, de *new age* y cosas por el estilo, pero en gran parte estamos ante una crisis de la razón, una crisis romántica, porque los romanticismos tenían eso. Si vemos sus características, se parecen mucho. ¿Y para qué serviría pensar en todo esto? Pues para entender y enfrentar respuestas del tipo: “no entiendo nada y no puedo hacer nada, vamos a vivir el presente”; o “vámonos a una nueva religión, astrología, o lo que sea”. Es decir, ya que estas crisis se parecen y se diferencian porque son propiedades de sistemas sociales en punto crítico, pues hay que aprovecharlo. Yo digo que las crisis de la razón, los romanticismos, son procesos de zona crítica y la crisis actual tendría mucho de eso. La característica general de estas crisis es que a partir de un dominio inicial del pensamiento racional, éste empieza a declinar, hasta que llegan a dominar las emociones y los misticismos.

Se diría que hay un misticismo cuando uno cree en algo aunque no lo pueda probar. Además, eso en lo que se cree es considerado una verdad evidente, cuya validez no necesita ser demostrada, y si le enseñan un contraejemplo se responde categóricamente buscando algún defecto. Esto no sólo pasa en la religión, pues a veces se dice que se necesita una mística política,⁵ porque cuando uno lucha por algo, en general, no se tiene la seguridad de que se pueda llegar a la utopía ni que al llegar allí no haya patología. Y en las crisis éstas, baja la razón, sube la emoción, y hay estos aspectos místicos.

A continuación comento dos crisis históricas: la primera es la helénico-helenística, y la segunda el romanticismo propiamente dicho.

Alrededor del siglo V a. C. las ciudades-Estado griegas estaban cómodas, no tenían muchos problemas, pues vivían de los esclavos, había confianza, tanto en

⁵ Ver los “Ensayos sobre una civilización perversa”, en Cocho, Flavio (2005). *Metapocatástasis de civilización*. México: CEFPSVLT, pp. 410–415.

sus instituciones como en su visión del mundo, etcétera, hasta que tienen que enfrentar las invasiones persas, que son derrotadas en la batalla naval de Salamina. Aprovechando el resultado, Atenas forma una especie de imperio colonial, con el que Pericles construye la Acrópolis, promociona las artes y todo un conjunto de cosas. Pero tiempo después otras ciudades de Grecia están inconformes, en particular Esparta, y como no le gusta el poderío ateniense le declara la guerra, la guerra del Peloponeso, lo que a la postre genera gran destrucción del mundo griego antiguo. Luego llega la invasión macedónica con Filipo y Alejandro y, pues, allí se acaba el mundo helénico; los historiadores consideran ese hecho como el inicio del periodo helenístico.

Conviene mencionar que la diferenciación de Esparta y Atenas es un ejemplo de cómo factores parecidos pueden dar lugar a culturas diferentes, pues el idioma era igual y la religión era igual, y, sin embargo, Atenas era una sociedad artístico-académica y Esparta una sociedad militar. Es un ejemplo que muestra que puede haber características generales, pero diferencias específicas.

Entonces, si comparamos cosas a nivel de arte, pensando en los romanticismos, encontramos similitudes. Por ejemplo, ya se tienen resultados al comparar las esculturas de Pérgamo con las de Atenas. Pérgamo era una ciudad al noroeste de Asia Menor, en el territorio de lo que hoy es Turquía, y resulta que el templo ahí construido es monumental, de hecho, los alemanes se lo llevaron piedra por piedra, y ahora está en Berlín, en lo que se conoce como Museo de Pérgamo.⁶ Y resulta que hay un gran friso continuo, conformando al podio, y cuya temática trata de la batalla contra los Titanes, y pues ahí se ven representadas primordialmente las emociones, la cara de encabritamiento, con cuerpos agitados y rostros dominados por la emoción. Por lo contrario, si uno ve la Venus de Milo, el Partenón o cosas parecidas de la cultura helénica, lo que muestran, además de su belleza, es una gran tranquilidad, no están enojadas, son poco emotivas. Y eso pasa también, lo veremos después, cuando en 1800 se transita del clasicismo al romanticismo y se rompe un conjunto de reglas y predomina la emoción. Es decir, en la transición helénico-helenística, a nivel de arte, ya se ve el predominio de la emoción.

A nivel de filosofía, la característica es que se pasa de filosofías universales, como las de Platón y Aristóteles (quienes querían comprender el mundo y explicarlo todo), a filosofías que como el epicureísmo, el estoicismo y el escepticismo, hablan nada más de una persona y de cómo debe comportarse. Entonces, en las crisis románticas se pasa de pensamientos generales a categorías muy locales e inmediatas, como la persona, la familia, etc., muy al estilo de Descartes: “pienso, luego existo”. Es decir, aunque Aristóteles y Platón corresponden al final del helenismo, se puede decir que tenemos el paso de filosofías helénicas generales a esas filosofías individualistas, en las que sólo importa el placer (aunque sea placer intelectual), o esas en las que hay que aguantar las cosas, o en las que uno duda de todo lo que hay.

⁶ Se puede hacer una visita virtual del museo en el sitio web: <http://www.smb.museum/museen-und-einrichtungen/pergamonmuseum/home.html>

Estas crisis también existen a nivel individual. Hay un caso que estaba asociado con alguien que lo divorciaron a la brava, ya se sabe cómo son esas cosas, y pasó de preocupaciones generales a decir: “la sociedad vale gorro, la familia, todo; sólo estoy yo y mi vecindad”, y luego, ya en la salida de la crisis, se fue ampliando el horizonte y todo quedó más o menos igual.

Entonces uno se pregunta: ¿y luego, qué pasó con esta transición histórica? Pues que después hubo una salida, llamémosla neoilustración, que tuvo lugar en Alejandría, tras la muerte de Alejandro Magno. Para entonces Alejandría era un crisol de gente diferente, porque ahí había griegos, egipcios, judíos, o sea, se dice que esta neoilustración se debe a “la potencia de la mezcla”; y también se desarrollan las ciencias. Entre los personajes de esta época se encuentran Arquímedes, Euclides, Ptolomeo y Eratóstenes, por ejemplo; y también Aristarco de Samos, quien concibe un sistema heliocéntrico y calcula la distancia aproximada de la Tierra al Sol.

Pero no sólo eso, también se desarrollan las técnicas, teniendo lugar una verdadera revolución industrial, pues el vapor no sólo era una curiosidad o un juguete, sino que era empleado en las minas, ¡hay unas cosas realmente impresionantes! La fuente principal de lo que digo es el libro de Lucio Russo,⁷ y que sugiere, desde el título mismo, que estamos ante una revolución olvidada o frustrada. Como no soy religioso, cuando lo vi por primera vez aposté que la causa de esa frustración había sido la llegada de la religión; pero no fue eso, es que llegaron los romanos y su cosmovisión de dominar al mundo, basada en sus legiones, no contemplaba estos aspectos que hoy llamaríamos tecnocientíficos. Y no sólo eso, sino que a los griegos se los llevan de esclavos, no tanto para las minas, sino como secretarios porque los romanos pudientes tenían dinero, pero eran analfabetas y los griegos no. Entonces, se aplasta esta impresionante revolución; de hecho, a nivel militar las máquinas que tenía Alejandro eran, no sé, por poner un número, 10 o 15 veces mejores que las máquinas de sitio que había en la Edad Media. Entonces, ahí el punto es que hay un cierto patrón: primero una especie de ilustración, luego una crisis de la razón, y eventualmente una salida a través de una neoilustración; en este caso, fue una revolución científica-industrial y que luego se colapsa.

Hay más de estas crisis de la razón a lo largo de la historia, pero se puede considerar a la helénico-helenística como la primera. Quizá conviene decir que hemos tratado de buscar en el Oriente, pero no encontramos ni en India ni en China ni en Japón, quizá porque somos malos pescadores.

Entonces, limitados a Europa, tenemos un segundo ejemplo: la revolución romántica, el romanticismo propiamente dicho, que tuvo lugar a caballo de 1800.

Resulta que hasta la Revolución Francesa se creía que con el conocimiento, con la Ilustración, el mundo iba a ser mejor. Claro que lo que le enseñaban a los ricos no iba a ser lo mismo que le enseñaban a los campesinos, pues a éstos les enseñaban cositas más pequeñas. En ese momento la Revolución Francesa es cúspide de la Ilustración, y se imponen cambios hasta en la forma de medir el tiempo, destacan-

⁷ Russo, L. (2003). *The Forgotten Revolution. How Science Was Born in 300 BC and Why It Had to Be Reborn*. Berlín: Springer.

do el calendario revolucionario francés, cuyos meses llevan nombres como Brumario, Nivoso, Germinal, etc., inspirados en un culto a la naturaleza. Pero luego viene la época del Terror, todo eso, y la República se colapsa.⁸ Hay, digamos, derrota de la revolución y hasta en cierto sentido perversión; hay personajes como Napoleón, quien se proclama emperador en algún momento, pero que extendió las ideas revolucionarias a toda Europa, y entonces la valoración histórica de él depende de cómo se interprete.

A nivel de la física tenemos a Sadi Carnot, hijo de Lazare Carnot. Este último era el principal ingeniero militar, primero de la República, esa que surge de la Revolución Francesa, y luego de Napoleón, una vez que habían sido derrotados los republicanos. Y pues Carnot “inventa” la termodinámica, ya decíamos, con todas las comillas que quiera uno poner. La termodinámica trata, como dije, de propiedades colectivas de muchas cosas, el calor es una forma de energía, y hay procesos irreversibles. Y había debate entre los mecanicistas, partidarios de Newton, por un lado, y los termodinámicos, por el otro. Los primeros decían: “No, no, lo redituable es lo de Newton”; y los segundos respondían: “No, vean; es que el mundo es esto otro, y además tiene una aplicación social para máquinas que no tiene lo otro”. Es un poco como la discusión que hay ahora entre reduccionismo, holismo y sistemas complejos. En mi opinión personal, no estamos ante un nuevo renacimiento, como se dice; es la confrontación de la neomecánica contra la neotermodinámica, pero en fin, tendría que justificar eso con detalles técnicos.

Se ve que en el romanticismo también pasa esto: domina la razón, hay crisis, se cuestiona la razón y se pone énfasis en la emoción. Hay figuras como Goethe, hay misticismo, pero uno muy particular que decía que en la naturaleza hay dos fuerzas contrarias. La idea que tenían los biólogos románticos, y un poco la física romántica, era que había pocos principios contrarios, y eso es una cosa interesante. Había una crítica fuerte a la Ilustración. Hay elementos político-sociales también, por ejemplo, el nacimiento de Alemania, que surge a partir de estados dispersos y fragmentados, en un momento en que prevalece el dominio intelectual de Francia. Todo esto demanda un análisis más profundo, pero se ve que es crisis de la razón, énfasis en la emoción, misticismo de astrología, nuevas religiones y esoterias. Como ahora, y como pasaba también en el caso de Alejandría, aunque no lo haya mencionado.

¿Y qué viene de esta crisis romántica, cuál es la salida? Ya decíamos que en física está la termodinámica, pero también se tiene al electromagnetismo y la óptica; en biología está Darwin y la selección natural. Y eso se puede interpretar: que en la salida de la crisis hay una nueva revolución científica.

Finalmente, hay que hablar un poquito de la crisis actual. Quizá en otro momento la podríamos analizar extensamente, pero sí quiero decir que es importante intentar eliminar lo que en mi opinión son palabras vacías, como *new age* o posmodernismo, porque lo que estamos diciendo es que el momento actual ocurre después del modernismo, pero no estamos profundizando en el análisis. Sólo es-

⁸ Se recomienda la lectura de “La Revolución Francesa y sus falsificaciones”, en Cocho, F. (2012). *Caleidoscopio cultural*, tomo II, pp. 215–307. México: CEFPSVLT.

tamos etiquetando el fenómeno, lo que no es hacer gran cosa. Además, para el momento actual tenemos que considerar que ahora hay algo de lo que en España llaman “el pelotazo”, un fenómeno que se resume en el dicho: “vuélvete rico a como dé lugar, siempre que no te agarren”, y entonces a nivel político y de gobierno está la corrupción; y a nivel empresarial también, hay crisis, hay quiebras fraudulentas. En otra época del capitalismo, cuando una empresa se declaraba en quiebra se suicidaban, pero ahora no. Entonces, estamos en una crisis “romántica”, entre comillas si se quiere por este hecho, esta característica, que no estaba en las crisis señaladas anteriormente: la importancia de ganar dinero a como dé lugar.

El punto de este apartado es, insisto, señalar que las crisis y los fenómenos críticos, las crisis sociales, se parecen. Entonces, viendo una crisis pasada podemos tener una idea de cuáles son los posibles caminos de salida de la crisis actual, y cuando se va por el chueco, pues empujar para el otro.

LO GENÉRICO DE LAS CRISIS Y DE LAS REVOLUCIONES

Las crisis de la razón, al ser un fenómeno crítico, van a tener muchas propiedades parecidas a gran escala o intermedias, y luego van a tener detalles característicos de cada una de ellas. En este mismo sentido tenemos las ideas del sociólogo portugués Boaventura de Sousa Santos, a quien cariñosamente le llamamos “Boa” porque es buena onda, y es que él propuso un concepto: la *hermenéutica diatópica*. Hermenéutica se refiere a interpretación o significado, y diatópica, a dos lugares. Y Boa acuña el término motivado porque en aquel momento estaba colaborando con un científico social mahometano, mostrando que en tiempos de Mahoma los hombres y las mujeres eran iguales y que, por tanto, eso de ‘la mujer a su casa y con el velo’ no era de Mahoma. O sea, era una lucha política basada en eso, aunque me temo que no ha tenido mucho éxito. Es decir, él proponía reinterpretar las cosas que había, conectando dos lugares. Pero mi hermano Flavio y yo nos dijimos: es que la conexión no sólo es en lugares diferentes, también es en tiempos diferentes. Y ya que estamos inventando términos, propusimos la *hermenéutica diacronotópica*.

El punto importante es que si uno mira otras crisis revolucionarias pasadas se van a encontrar parecidos con el momento actual y uno va a entender cuáles constituyen el abanico de caminos de salida, cuáles son los buenos y cuáles son los malos, sin olvidar que aparte de estas cosas genéricas va a haber cosas específicas. Y eso es mejor, porque tendríamos criterios de lucha, en vez de decir: “no entiendo ni una pizca, porque es que los hombres son unos malditos; todo el mundo es corrupto, y el que no, es porque no le dieron chance”. Lo que quiero decir es que hay lecciones para la acción, que era lo que también estaba buscando Boa.

De paso, hay que mencionar que lo que buscaba Boa también pasó en la revolución de Argelia, pues inicialmente los hombres y las mujeres eran iguales, y cuando gana la revolución ya no. De cualquier modo, Argelia no es Arabia Saudita, por poner un ejemplo. Concluyendo un poco con el momento actual, podemos decir que en estos tiempos de duda hay que mirar otras crisis sociales revolucionarias, porque ahí va a haber lecciones positivas.

HUMANISMO Y ÉTICAS

Comencemos con las tres condiciones de Francisco Ayala,⁹ quien es un biólogo especialista en selección natural y evolucionismo. Él tiene un ensayo en el que se pregunta si se puede derivar una ética justa partiendo de la biología, y llega a la conclusión que no, pero es interesante que defina condiciones para una ética. La primera condición a la que se refiere dice, poco más o menos, que debemos tener la capacidad de predecir e ir para atrás. O sea, ser capaces de construir modelos y, en virtud de eso, decir qué cosas pueden pasar. La segunda, poder separar las cosas que pueden pasar, por lo menos, en dos grupos. A nivel de ética, los grupos serían bueno y malo, pero en la estética serían bonito y feo. Y la tercera, que tengamos la capacidad de prever: si hago esto se va para lo bueno y si hago aquello se va para lo malo. Por tanto, esto sugiere que una condición inicial es el poder construir modelos internos, mentales; que además se puedan clasificar y que se tenga control, para ser capaces de decir: “si aprieto esto en mi modelo, se va para acá, que es lo que a mí me parece bueno”.

Conviene tener en mente la ética cristiana y la ética pagana, terminología que se atribuye a Isaiah Berlin. Con ética cristiana, equiparable en cierto sentido con la ética kantiana, me refiero a aquella donde predomina el deber, la prescripción, pues hay unos mandamientos y hay cosas que son buenas y malas. Y con ética pagana, que es la ética de los griegos, me refiero a tener un modo de vida en que seas feliz siempre que sea consistente con el resto de la sociedad.

El punto es que si mezclamos eso de los sistemas complejos en zona crítica con estas éticas, la ética cristiana estaría asociada a lo genérico y la pagana se correspondería con “cada cabeza es un mundo”, ya que equivale a decir: “yo trato de ser feliz, quizá de modo diferente del vecino, siempre que no fastidie”.

Así, quizás vale un comentario histórico: En el Renacimiento hubo un intento de unir ambas éticas, durante la época en que los Papas tenían amantes, había hedonismo, traiciones políticas y otras cosas, pero como es un tiempo en que se enfatiza la cultura griega y romana, se intenta buscar una solución para unir las dos éticas; luego vino la Reforma protestante, y a continuación la Contrarreforma, y dicho intento se fue por un caño. Lo que quiero decir es que el Renacimiento es una crisis romántica de algún tipo, aunque no viene al caso analizar en este momento, pero el contexto actual, al ir entendiendo estas cosas de los sistemas complejos en zona crítica, se presta para que haya una síntesis de ambas éticas.

HUMANISMO CREATIVO

A fin de poner en una frase algunas características deseables en una sociedad justa, propongo: “individuación creativa y felicidad”. Lo de felicidad ya lo comenté un poquito, pero eso implica, entre otras cosas, derechos humanos no sólo individuales sino colectivos.

⁹ Ayala, Francisco J. (1987). “Evolución y moral”, en *La naturaleza inacabada. Ensayos entorno a la evolución*. Barcelona: Salvat, pp. 245–262.

En este sentido, tenemos a Norbert Wiener,¹⁰ del MIT, un gran matemático con inquietudes sociales. Él hablaba de los derechos humanos y una de las cosas que planteaba era el derecho a no ser explotado por los demás, y claro, la gente alrededor decía: “este Wiener será buen matemático pero es muy ingenuo”, y ese tipo de cosas.

Hay que darse cuenta de que cuando hablamos de derechos humanos no individuales, sino sociales, implican un deber. En el caso de Wiener, se diría: “que no me exploten, pero que tú no explotes”. Y estos deberes, más las características específicas de cada persona, estarían medidos en felicidad. Así, dos de los ingredientes de la felicidad serían los derechos humanos, individuales y colectivos, y estos últimos implican deberes.

Relacionado con la necesidad de agregar como característica de una sociedad más justa a la creatividad, hay que pensar en los contraejemplos planteados, tanto por la solución polinesia, como por la visión de H. G. Wells:

- A los polinesios se les ha llamado los “vikings del Pacífico”, porque eran grandes navegantes; de hecho, originalmente salieron de Java, una isla pequeña que está ahí, muy cerca de lo que es Java, y llegaron sorprendentemente hasta la isla de Pascua, en Hawai, a mitad del océano Pacífico, contando sólo con canoas grandes y de una velita. Mientras estaban haciendo tales travesías había motivación, retos, tenían arte y eran un pueblo creativo. Pero en algún momento paran en el trópico, y como no tenían problemas con los alimentos, degeneran. Para cuando llegan los europeos ya no había espíritu de aventura, y al verlos tan cómodos dijeron: “esto sí es vida”, pero había cola, declinación.¹¹
- El escritor inglés Herbert George Wells tiene muchas novelas, pero quizá es más conocido por los cuentos de ficción científica. En algún momento deja de escribir ficción, dedicándose a escribir manifiestos políticos y artículos periodísticos luchando por el socialismo. Pero al leer parte de su obra, uno puede preguntarse: ¿qué sociedad futura podría tener en mente el socialista H. G. Wells? En su *Máquina del tiempo* describe una sociedad estable que no tenía problemas y en cierto sentido feliz, pues se componía de un conjunto de idiotas muy apacibles, los eloi, y de unos monstruos subterráneos que se los comían, los morlocks. Entonces, ahí aparece la importancia de la cosa creativa.

Partiendo de ambos casos, se ve que esa sociedad más justa por la que propugnamos debería tener como ingrediente la felicidad, pero también que sea creativa,

¹⁰ Se recomiendan sus textos: Wiener, N. (1948). *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*. USA: The MIT Press; Wiener, N. (1981). *Cibernética y sociedad*. México: CONACYT; y Wiener, N. (1995). *Inventar. Sobre la gestación y el cultivo de las ideas*. Barcelona: TusQuets.

¹¹ Los textos que a continuación se citan abordan el asunto de manera importante: a) “El camino hacia Polinesia”, en Stent, Gunther S. (1986). *Las paradojas del progreso*. Barcelona: Salvat, pp. 51–65; b) “La esperanza de progreso”, en Barrow, John D. (1999). *Imposibilidad. Los límites de la ciencia y la ciencia de los límites*. Barcelona: Gedisa.

porque si decimos felicidad a secas no es suficiente. Dicho sea de paso, y en el mismo sentido distópico, el *Mundo feliz*, de Aldous Huxley, también coincide con lo dicho.

Vayamos ahora al aspecto de la individuación y de su autor, Carl Gustav Jung, quien es una de las figuras clave de la psicología analítica. De hecho, y por orden de importancia, tendríamos la terna Freud, Jung y Adler. Lo que tiene la psicología de Jung es que uno la puede traducir en algunos conceptos de estos científicos de la complejidad. Freud es más difícil, pero tiene el mérito de haber dicho: “calma, si hay una locura no quiere decir nada más que sea una lesión orgánica, depende de la cultura, depende de un conjunto de cosas”. Resulta que uno de los conceptos que propuso Jung es el inconsciente colectivo; y jugando con sus aportes y los de Freud, alguien decía: “si el inconsciente es el padre del yo, el inconsciente colectivo es el abuelo”, pues Jung plantea que a lo largo de la historia ha habido un conjunto de necesidades, retos y problemas, cuyas soluciones se han ido fijando en la herencia. Pero como lo propuso en el lenguaje lamarckiano, que en su época implicaba una descalificación inmediata, y como además era psicoanalista, entonces le fue como en feria, terriblemente mal. Sin embargo, el inconsciente colectivo equivale a que en diversas culturas hay rasgos comunes, y eso se puede interpretar como restricciones que tiene el cerebro humano, sugiriendo que las diversas culturas son parecidas, no porque hayan tenido que resolver los mismos problemas (aunque pudiera ser un factor importante), ni porque se hayan asimilado por herencia o por mutaciones, sino porque el cerebro hace lo que puede, tiene neuronas, tiene ruido, y hay ese tipo de cosas.

Jung dice en algún momento que a veces, cuando la gente ya tiene alrededor de 50 años, entra en crisis, no le ve sentido a la vida y entonces él habla de individuación: el que la gente tenga que buscar algo que le dé sentido externo a su vida. Acto seguido, exhibe dos posibilidades para resolver la crisis. Una de ellas es la religión, entendida no como un conjunto de mandamientos sino como el que haya algo externo; y la otra, que deje de ver nada más su máscara y que vea a las demás personas y a la naturaleza, o sea, que se sienta que es parte de un conjunto más grande, incluyendo al mundo natural.

En el lenguaje de un físico estadístico, como yo, diríamos que el ser humano no puede ser un sistema cerrado, sino que debe haber: a) un campo externo, eso sería la religión; b) si no hay campo externo, entonces un campo medio, equivalente a que la problemática que uno tiene está influenciada de ver la problemática de los demás. Por otro lado, aunque Jung es en gran parte un gnóstico del conocimiento revelado, pues tiene otras facetas, retomo esto: la idea de individuación es que uno salga de su cascarón, que le importen los demás incluyendo el planeta Tierra y que trate de ser feliz sin fastidiar a los otros.

Dado que lo que se está buscando son cosas para la acción, todo lo anterior se tendría que elaborar más profundamente y someterse a prueba, y entonces da para un conjunto de seminarios y talleres, pues son ideas para trabajar en varios planos.

HETEROGENEIDAD DE LAS REDES SOCIALES
Y COMUNIDADES DE APRENDIZAJE Y PRÁCTICA

Si tenemos una red social compleja decimos que es heterogénea pues, en general, no va a ser pareja, va a tener chipotes. Y eso sugiere alguna forma de organización social; de hecho, ya tienen nombre, son las comunidades informales de aprendizaje y práctica. Se considera que funcionan cohesionadas por un tema o por unas metas. No son homogéneas, pues se ha observado que hay un grupo pequeño que le pone más énfasis, y luego puede haber varias envolventes con compromisos decrecientes, es decir, algunos hacen poco y otros nada más hacen una labor chiquitita; entonces están articuladas en una red heterogénea, y dado que se contempla el aprendizaje y la práctica, habría bastante trabajo fenomenológico y teórico.

Por otro lado, están las comunidades de ayuda mutua. Se ha observado que operan cuando la gente está muy mal económicamente, pues usualmente se ayudan entre sí, por ejemplo, cuando una mujer deja al niño pequeño con la vecina y posteriormente se prestan objetos o se intercambian favores; un conjunto de estos aspectos son los que las definen. Pero es importante señalar que no es claro que funcionen bajo cualquier circunstancia, pues se ha observado que cuando se está relativamente bien no operan; pareciera que hay un cierto umbral económico para la solidaridad, al menos del tipo de la que nos estamos refiriendo.

Dos ejemplos de lo inmediato anterior. El primero se refiere al príncipe ruso anarquista Piotr Kropotkin, quien tiene un libro sobre la ayuda mutua, y donde sostiene que los animales se pelean pero sólo con otros, no dentro de su misma especie, y señala que con los humanos así pasaba hasta la llegada del capitalismo. Describe cómo en la Inglaterra de la segunda mitad del siglo XIX, durante el inicio de la Revolución Industrial, cuando a los obreros y a la gente común le iba pésimo, había estas estructuras de ayuda mutua: se intercambiaban favores, se cuidaban a los niños, enfermos o ancianos entre sí, se repartía comida y labores recíprocamente, y se cooperaba de forma solidaria.

El segundo ejemplo es sobre la tesis doctoral de la socióloga, de origen chileno, Larissa Adler de Lomnitz, y publicada después como libro.¹² Ella describe cosas ocurridas en México. Hasta donde recuerdo, su trabajo describe lo que pasaba en algunas colonias populares con alto grado de marginalidad, tal vez se ubicaba donde ahora es Santa Fe, y en las que había estas estructuras de ayuda mutua.

Entonces, diríamos que todas estas comunidades son naturales, hasta cierto punto, por el carácter heterogéneo de las redes complejas.

Más que entonados en las modas recientes al hablar de redes (de investigación, de publicación, etc.) yo creo que la búsqueda de estas estructuras informales vislumbra una salida y habría que ver cómo estudiar esto en la UNAM; en general, considero que sería importante estudiar a los sistemas sociales como sistemas complejos en zona crítica.

¹² Lomnitz, L. A. (1975). *Cómo sobreviven los marginados*. México: Siglo XXI.

Una de las últimas cosas que quiero decir es como una adivinanza. Considerando que las crisis románticas son crisis de la razón, éstas de las que hemos venido hablando, y de las que hay más casos (por ejemplo, la que hubo en Alemania después de la Primera Guerra Mundial), se ve que hay un cierto patrón genérico: después de la crisis hay una neoilustración que abarca muchos campos y entonces es natural preguntarse: cuál será la segunda revolución científica. Es decir, lo que hemos hablado sugiere que en una parte del asunto está metida la complejidad y los puntos y zonas críticas, y entonces uno se puede preguntar: ¿y qué pasará en la física?

Hay un Premio Nobel en Estados Unidos, Robert Laughlin,¹³ cuya línea de razonamiento se relaciona con esta última pregunta. De hecho, sus argumentos se pueden considerar como la continuación de las respuestas a un interrogante muy viejo, desde los tiempos de Galileo o más viejo, quizá el último que lo pone así muy fuerte es Eugene Wigner,¹⁴ un físico húngaro también Premio Nobel en su momento, cuyo ensayo trata sobre “la irrazonable eficacia de las matemáticas en las ciencias naturales”; puesto en forma de pregunta equivale a: ¿por qué leyes muy sencillas, principios muy sencillos, pueden explicar tantas cosas? Una de las respuestas es el diseño inteligente. ¿Por qué? Porque teniendo un ser supremo (algunos le llamamos *El Barbas*) se puede responder: “porque él inventó esas leyes sencillas y lo hizo porque le dio la gana”. Pero la línea de pensamiento de Laughlin es distinta; él dice: 1. Si nosotros escribimos ecuaciones, posibles ecuaciones de fenómenos físicos, en la gran mayoría de casos no podemos calcular nada, y tenemos el hecho de que las poquitas que tenemos son sencillas y podemos calcular. 2. Estas ecuaciones, estas teorías de norma, dependen del espacio externo (dimensiones del espacio) y del grupo de simetría del espacio interno, y a partir de eso, él señala que eso ya suena como a los fenómenos críticos (a los que ya nos hemos referido), sólo que en estas cosas los grupos de simetría de repente son grandotes. Concluye diciendo que la física es sencilla porque estamos en punto crítico, y está tan cerca del punto crítico que es supersencilla. Entonces, lo que está diciendo implica que la física no es fundamental sino que es un emergente de algo, y que si queremos entenderla un poco, más bien se parece a la biología o a la sociedad. Y es una línea de trabajo.

Hace no mucho hubo en Viena¹⁵ un taller de mecánica cuántica como emergente, cuya línea de trabajo considera que la mecánica cuántica y las ecuaciones de norma (electromagnetismo, interacciones débiles, etc.) tienen tal sencillez no porque sean básicas, sino porque son emergentes, resultan de estar en punto crítico y eso podría ser parte de una revolución, porque implica darle la vuelta al pro-

¹³ Laughlin, Robert B. (2005). *A Different Universe: Reinventing Physics from the Bottom Down*. Basic Books. [Existe versión en español: *Un universo diferente. La reinención de la física en la edad de la emergencia*. Buenos Aires/Madrid: Katz Editores, 2007].

¹⁴ Wigner, E. P. (1960). “The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences”, *Communications on Pure and Applied Mathematics* 13(1): 1–14.

¹⁵ Hay un sitio asociado a dichos encuentros, incluyendo el de octubre de 2013: <http://www.nonlinearstudies.at/index.php>

blema. En fin, es una adivinanza, pero yo diría que tiene que ver con complejidad y criticalidad, incluyendo que la cuántica y las ecuaciones de norma pueden ser emergentes.

Como para contrastar, hasta hace poco los que trabajan en mecánica cuántica contaban un chiste sobre los complejólogos, ya que como decimos: "todo el mundo es complejo" y aplaudimos, ellos aclaraban: "menos un resorte, pues las ecuaciones de la física cuántica son lineales", y entonces la respuesta un poco cabizbaja era: "es que ahí la naturaleza tenía ganas de molestar". Ahora, con las últimas discusiones, la respuesta ha cambiado y se dice: "es que cosas no lineales pueden tener consecuencias emergentes lineales", en matemáticas equivale a pasar de una ecuación de Langevin a una de Fokker-Planck,¹⁶ por decir algo. Lo que quiero decir es que cuando se ataca a los físicos por reduccionistas se olvida decir que los físicos de frontera quieren reducir la física a la biología y no la biología a la física, y son gente de Premio Nobel, aunque se dice, como para disculparlos: "bueno, es que son muy buenos", pero eso no contempla todo; es que es parte de esta dinámica que he descrito, es complejidad en zona crítica. En otras palabras, cuando lo que quieres es ser consistente y consideras todos sus aspectos, te viene la pregunta de si todos los niveles son emergentes, en particular éste, y entonces empiezan las técnicas.

En resumen, y ya casi terminando, dos cosas. Uno, que las características de sistemas complejos en zona crítica nos pueden servir para comprender biología, y también nos pueden servir para entender aspectos del momento en que vivimos y no decir: "como esto es muy confuso, pues vamos a vivir bien el presente" o "me voy de neohippie contracultural" o cualquier cosa parecida. No, no, si uno mira en la historia entiende que se pueden hacer cosas y que, en particular, es importante que en las universidades se hagan cosas. Afuera hay movimientos de organización de base, Morena es una historia de estas, es un intento de ello. Pero a nivel teórico-práctico creo que se puede hacer labor; ahí están los seminarios de Ciencia y Sociedad y de Naturaleza y Sociedad, y la idea de tener varios colectivos, de ser una comunidad de aprendizaje y práctica. Lo que quiero decir es que algunos trabajan con el ejemplo, y por tanto, se les invita a que mastiquen un poco todo lo anterior (si es que es masticable). Y tengan la seguridad de que viendo los movimientos del pasado y las relaciones entre ciencia, sociedad, crisis, historia, anticiencia, etc., pueden servir para tener una idea de qué cosa positiva se puede hacer.

Hay una cosa que no he comentado y es que en los puntos críticos el esfuerzo organizado de un número pequeño de agentes puede ser fundamental para modificar la dirección. Después, si se cimenta algún estado físico, un modo de producción, olvídense, no lo mueven. Pero en dichos momentos de transición el esfuerzo organizado puede servir para ayudar a que no se vaya por el mal camino. Entendiendo que no hay un librito, no hay un manual donde ya estén las recetas, todo lo dicho son similitudes, son analogías, hay núcleos duros, pero hay que ser humilde y aprender, y atreverse a decir: "El mundo es más complicado de lo que pensé y si me equivoco voy de lado".

¹⁶ Risken, H. (1989). *The Fokker-Planck Equation: Methods of Solution and Applications*. Berlín: Springer.

Coincidente con esto último tenemos a Oskar Lafontaine, un político de la zona de izquierda, del Partido Socialdemócrata Alemán; junto con algunos miembros del viejo Partido Comunista, hace poco tiempo fundó una corriente, "Los de izquierda",¹⁷ y ya dejó la política porque tiene un cáncer de hígado. Pero en su libro *La sociedad del futuro* tiene una frase en la que hay que pensar: "se vale meter la pata, siempre que uno pueda sacarla", aunque hay veces en que no se puede.

Por ejemplo, la megalópolis algún día tendrá 40 millones de habitantes y tú dirás: "bueno, cuando venga la revolución se arregla...", ¿y qué?, ¿cómo?, ¿partes la Ciudad de México en veinte cachos? No se puede. A esto Lafontaine lo califica de megamáquina, pues dice que hay tecnologías, cosas, que una vez que echan a andar no tienen reversa, y lo poco que puedes hacer es modular para dónde va y eso ya es un poco enmendar la metida de pata. Es una frase bonita: "se vale meter la pata, siempre que se pueda sacar", lo que me recuerda una frase de López Obrador que dice: "aquí podemos meter la pata pero no la mano".

En fin, he puesto bastantes conceptos y lo dicho es relativamente amplio, eso quiere decir que es un panorama un poco impresionista, porque las estructuras básicas que están detrás no las puedo presentar en tiempo corto. Pero, en fin, espero que los hagan pensar, y que después de pensar les sugieran, los muevan hacia la acción, a hacer algo.

¹⁷ El nombre en alemán es *Die Linke*, organización que ha tenido presencia parlamentaria desde 2005.

COMPLEJIDAD, SISTEMAS DE SALUD Y CALIDAD *

*Todo es simple y ordenado,
excepto por supuesto el mundo.*
Leo Kadanoff

DESDE mediados del año 2002 y hasta finales de 2004, iniciamos en la Secretaría de Salud un proyecto que nos dejó ricas experiencias interdisciplinarias, el cual consistió en intercambiar conocimientos entre médicos, físicos, biólogos y matemáticos. Al analizar los resultados podemos observar que no nos equivocamos cuando planteamos la relevancia que esto podría tener para los sistemas de salud.

La calidad se ha convertido en un tema muy importante en todo el mundo; la investigación que se realiza sobre ella en el campo de la salud constituye un aspecto clave, en especial para los servicios médicos que se brindan; ya sea que se trate de grandes centros hospitalarios, clínicas, consultorios o bien facultades y escuelas que imparten conocimientos sobre ciencias de la salud. En este capítulo proponemos el uso de las herramientas que nos proporcionan las Ciencias de la Complejidad para entender y precisar mejor los problemas, con la finalidad de extrapolar en forma reflexiva y mesurada los nuevos hallazgos de la biofísica y de las matemáticas a un sistema social como el que se aboca a los cuidados de la salud. Por ello en este primer capítulo se tratan algunos conceptos que pueden trastocar las ideas que se consideran clásicas en lo que atañe a calidad, que, como mencionamos, plantean un nuevo paradigma.

Partimos, entonces, de una revisión crítica del modelo clásico que sustenta el quehacer médico en sus diferentes áreas de acción. Al proceder de esta manera, nos percatamos de que los métodos que utilizamos para estudiar los fenómenos de la realidad tienen como limitación que efectúan esta tarea de manera aislada sin considerar las interacciones de sus múltiples componentes internos ni las propiedades que surgen como resultado de esas interacciones y las que se dan con el entorno.

Advertimos, en consecuencia, que el paradigma que nos lleva a considerar los sistemas como la simple suma de las partes, es decir, como un resultado lineal de la adición de insumos y productos tiene limitaciones.

* Ensayo escrito por Enrique Ruelas, Germinal Cocho y Moisés Villegas. Publicado en: Ruelas, E., Mansilla, R. y Rosado, J. (coords.), 2006. *Las ciencias de la complejidad y la innovación médica. Ensayos y modelos*. México: Secretaría de Salud / CEIICH-UNAM, Instituto de Física-UNAM.

Asimismo, nos percatamos de que las teorías de la organización y la administración no dan respuesta satisfactoria a los viejos ni a los nuevos problemas; la burocratización, la heterogeneidad en las formas de dirección, la estructuración centralizada y vertical, así como la visión lineal en el diseño y planeación son, entre otros, obstáculos importantes que impiden el buen funcionamiento de los sistemas de salud.

Por ende consideramos que la calidad y sus múltiples componentes: entre ellos su control, aseguramiento, reingeniería o su garantía, requieren de una revisión que conduzca a encontrar un nuevo sustento epistémico. Así, nos hemos propuesto “viajar por estas mismas tierras, pero tratando de verlas con nuevos ojos”.

LOS PROBLEMAS Y SU APROXIMACIÓN

En el epígrafe de este capítulo citamos a Leo Kadanoff, quien nos previene de la que tal vez es la mayor dificultad que podemos hallar en nuestro recorrido: la contradicción dialéctica entre lo simple y lo complejo.

En el umbral del siglo XXI, encontramos una problemática diversa y complicada para los sistemas de salud, inmersos en crisis “globalizadas” que configuran un entorno difícil, con transiciones epidemiológicas en las cuales los padecimientos crónicos, otrora más frecuentes en los países desarrollados, se manifiestan prácticamente en forma epidémica, como sucede con las ahora llamadas enfermedades complejas, que representan casi el 65% de los problemas de salud pública: diabetes mellitus, hipertensión arterial, obesidad, cáncer, etc. Pero esto se complica porque, además, no han sido erradicadas patologías infecciosas como la tuberculosis y, para colmo, han aparecido otras entre las que destaca el VIH-SIDA. A lo anterior se añaden problemas no resueltos en la atención materno-infantil o los relacionados con los cambios sociales de vida y ambientales como los accidentes, intoxicaciones, contaminación, adicciones, etcétera.

Podemos afirmar que éste es el entorno que favorece el surgimiento de la percepción social, expresada individual o colectivamente, según la cual la atención médica es insatisfactoria.

El entorno general está determinado por las estructuras económica, política y social en el cual problemas como la transición epidemiológica han hecho evidentes las limitaciones de los sistemas de salud.

COMPLEJIDAD, MULTIESCALAS Y EL BINOMIO EFICACIA-EFICIENCIA

Kadanoff¹ plantea que los objetos, organismos o sistemas de la vida real suelen tener diversos aspectos, unos simples y otros complejos. Sin importar el fenómeno que se quiera estudiar o la pregunta que se pretenda contestar, se emplean técnicas de tipo reduccionista, propias de los sistemas simples o algunas herramientas de los sistemas complejos. Como ejemplo, podemos mencionar que en muchos de los aspectos y escalas propios de los sistemas de salud, a nivel práctico, hay aspectos

¹ Kadanoff, L. P., Goldenfeld, N. 1999. Simple Lessons from Complexity. *Science*, 284: 87-89.

relativamente simples los cuales consisten, en su mayor parte, en tareas simples y repetitivas. Así mismo existen aspectos complejos, en cada caso, casi únicos, en los que resultan ineficaces las técnicas repetitivas estandarizadas. Por lo regular, es necesario efectuar un continuo de tareas de complejidad variable, para lo que se requieren diversos tipos de técnicas. Por un lado, es necesario un sistema de alta eficiencia capaz de llevar a cabo tareas repetitivas relativamente simples, tales como pruebas diagnósticas de *screening*, inoculaciones y cuidados generales de salud; por otro, se precisa de un sistema de complejidad grande para tratar problemas médicos complejos de pacientes individuales. Sólo si se tiene esto en mente podremos realizar cambios en la estructura de los sistemas de salud que mejoren la calidad de sus servicios y reduzcan los costos. Es factible establecer un equilibrio entre la eficiencia asociada a las técnicas estandarizadas, inherentes a los sistemas simples, y la eficacia relacionada con los casos complejos individuales. Como en general las escalas de ambos tipos de problemas son diferentes, (dado que la de los sistemas simples es mayor), este enfoque se denomina *análisis de multiescalas*, aunque en ciertas ocasiones el tamaño de las escalas resulta similar.

Existen herramientas para estimar la complejidad de los diversos aspectos y escalas de un sistema, que se pueden aplicar con provecho al análisis de los sistemas de salud.

Se debe tomar en cuenta que los sistemas complejos, entre ellos las organizaciones, trabajan mejor cuando se diseñan los procesos con el menor número de pasos y gente. Si los procesos son cortos y simples habrá menos oportunidades de que se cometan errores. Sin embargo, no se ha de olvidar que la redundancia es necesaria en los procesos, ya que los robustece y evita que se colapsen cuando falla un eslabón. Por ende, se requiere un equilibrio entre la economía de pasos y la redundancia que confiere solidez. De nuevo, resulta obvio que este tipo de análisis ofrece múltiples beneficios a los sistemas de salud.

A nivel básico se ha aprendido del estudio de otros sistemas complejos (en especial las redes complejas), sin importar que su comportamiento sea bueno o malo, que el resultado no corresponde al dado por la suma de las partes. Por ello advertimos que aunque personal médico altamente calificado realice de manera correcta su labor individual, el resultado puede ser malo para el paciente, si no se coordinan los esfuerzos y se comparten las decisiones. Esto sólo es posible si se evita que haya demasiadas restricciones asociadas a protocolos y mecanismos de acción estereotipados. Una red compleja bien organizada tiene capacidad para resistir, adaptarse y compensar fallos locales, amén de que su desempeño conjunto (como un todo) puede exceder por mucho la adición de las capacidades individuales.

Existe la posibilidad de que muchos de los problemas se deban al modo como son educados los médicos y demás personal de salud. Esto fue reconocido por el American Council for Graduate Medical Education que estableció nuevos lineamientos que incluyen "prácticas basadas en sistemas", "habilidades de comunicación" y "aprendizaje basado en la práctica común".

El estudio de diferentes sistemas complejos puede permitir, por analogía, un diseño más adecuado de diversos aspectos de los sistemas de salud y hacernos

conscientes de sus fortalezas y debilidades, a la vez que nos sugieren modos y caminos para reforzar las fortalezas y disminuir las debilidades.

Para obtener información sobre el análisis multiescalas y su relación con el binomio eficiencia-eficacia, se pueden consultar los artículos de Y. Bar-Yam en la página web: <http://necsi.org>, que ofrecen una amplia descripción del tema.

FENÓMENOS CRÍTICOS, ROBUSTEZ Y ADAPTABILIDAD

Como es sabido cuando los sistemas sufren un cambio de fase experimentan fenómenos colectivos en los que participan muchos de sus componentes con correlaciones en todas las escalas.

Por ejemplo, si calentamos agua cuando alcanza la temperatura de 100 °C se transforma en vapor. Poco antes de que esto suceda, surgen en el líquido pequeñas burbujas que luego desaparecen. Al llegar a los 100 °C, una de esas burbujas sigue creciendo, hasta convertirse en vapor, aunque quedan pequeñas gotas de agua, que aparecen y desaparecen; poco después disminuyen rápidamente y desaparecen por completo, conforme se supera la temperatura de evaporación. Esto permite apreciar una característica fundamental de los cambios de fase: la aparición de fluctuaciones y de mecanismos de amplificación de dichas fluctuaciones. En el punto crítico, en el cual hay gotitas de todos los tamaños, éstas dispersan la luz, lo que hace que el líquido pierda su transparencia y se vuelva opalescente. Este fenómeno es lo que se denomina *opalescencia crítica*.

Los cambios de fase comprenden dos conceptos importantes denominados *parámetros de orden* (los que describen propiedades importantes del sistema en cuestión y cambian de manera drástica en el punto crítico) y *parámetros de control* (aquellos cuya variación da lugar al cambio de fase). En la transición de líquido a vapor, el de orden corresponde al porcentaje de agua y el de control a la temperatura. En el ejemplo expuesto, se aprecia con claridad cuál es el parámetro de orden y cuál el de control, ya que se trata de un sistema relativamente simple, pero en los sistemas complejos puede haber varios de esos parámetros y con frecuencia resulta difícil encontrarlos.

En los párrafos anteriores tomamos como ejemplo un sistema físico, no obstante los sistemas biológicos y sociales pueden tener un comportamiento similar. Entre los primeros podemos mencionar cambios de fase asociados al plegamiento de proteínas y el cambio en el comportamiento de las hormigas, las cuales cuando se hallan aisladas realizan movimientos azarosos o caóticos, pero modifican esta conducta y actúan de manera sincronizada cuando aumenta la densidad de su población e interactúan con sus congéneres.

Cabe mencionar que los sistemas biológicos en su punto crítico muestran una gran capacidad de adaptación y de cómputo, lo que podríamos llamar capacidad cognoscitiva. En la zona crítica es posible distinguir componentes de un continuo tanto de tamaños como de tiempos de relajación, que van desde los que son sumamente cortos hasta los muy largos. Hay estructuras que permanecen invariables durante largo tiempo y otras que cambian con rapidez. Las que tienen larga vida,

corresponden a lo que podríamos denominar *hardware*, y se asocian a la robustez, mientras que las que cambian rápidamente y concuerdan con lo que sería el *software*, pueden ser la base de la adaptación y el aprendizaje. Los organismos vivos, en sus diversas escalas y niveles trabajan en zona crítica, lo que los hace a la vez robustos y adaptables. Lo anterior sugiere estrategias de aprendizaje en nuestro mundo de cambios rápidos. En un ambiente variable y en revolución permanente se tiene el problema de la obsolescencia del conocimiento. Waddington advierte esto en su libro *Instrumental para el pensamiento*² y propone lo siguiente:

Seríamos demasiado optimistas si creyéramos que alguien realmente sabe lidiar con este ambiente, la solución tal vez depende de que se promuevan los siguientes aspectos:

1. Enseñanza de principios generales que se volverán anticuados de un modo más lento.
2. Métodos de enseñanza para buscar rápidamente en una zona amplia la información fáctica actualizada, que colocará la "carne sobre los huesos" cuando sea necesario aplicarla.
3. Métodos de enseñanza para clasificar la información conforme a un orden jerárquico de categorías, de manera que los elementos (ítems) relevantes a un contexto particular puedan ser filtrados con rapidez.
4. Fomentar la autoeducación continua después de haber terminado la instrucción formal.

Todavía queda por estudiar los resultados que produciría exactamente la mezcla de estos elementos y cómo se alcanzarían los objetivos propuestos.

PELIGRO-OPORTUNIDAD

En estas condiciones, como lo plantean los ideogramas chinos, si consideramos las crisis como situaciones de peligro y oportunidad, es posible construir sistemas de salud que den respuesta a la problemática existente, para superar las dificultades que no pueden ser resueltas con el paradigma clásico, dadas sus limitaciones.

Lo más adecuado sería que la planeación y el diseño de los sistemas de salud requeridos no sólo den respuesta a los problemas actuales, sino que además tengan la capacidad de adaptación al entorno. Es decir, se deben crear estructuras cuya propiedad esencial sea la robustez.

De esta manera no sólo podremos replantear la organización, sino también el concepto de calidad. Más aún no sólo será factible mejorar el funcionamiento mediante el diseño con redes complejas, sino que además se podrán utilizar mecanismos como la redundancia, automatización, simplificación y reducción de complejidad en el manejo de la multiplicidad de variables, que en la actualidad resulta muy difícil.

² Waddington, H. 1979. *Instrumental para o pensamento* (traducción de GCG). Brasil: Editorial de la Universidad de San Paulo: 35.

LOS HILOS DE CONTINUIDAD Y LA HERENCIA A LA QUE RENUNCIAMOS

Si bien, desde una perspectiva histórica podemos considerar que los sistemas de salud constituyen una respuesta social organizada, las estructuras centralizadas y verticales, que fueron producto de una necesidad concreta, se volvieron sumamente burocratizadas y en la actualidad son una de las principales trabas para que cumplan las funciones para las que fueron creadas.

Podemos considerar que las funciones básicas de los sistemas de salud son: la promoción, prevención, curación y rehabilitación, responsabilidades de las que no pueden desvincularse la docencia y la investigación. Además, los sistemas tienen como meta proporcionar salud a las personas y se hallan mediados por su carácter que puede ser privado o público.

En México el sistema de salud depende de instituciones públicas y privadas, cuyo auge se vio condicionado, entre otras razones, por el desarrollo de las instituciones y de las empresas industriales y de servicios durante el periodo en que se alentó la sustitución de importaciones. Dado que esto propició que cada vez se requirieran más servicios para atender a un número mayor de usuarios, llegó el momento en que no fue suficiente sólo el aspecto cuantitativo, sino que se agregaron dos necesidades más que devinieron en propiedades imprescindibles: la eficiencia y la calidad.

El estudio de los fenómenos y objetos de la realidad nos muestra, de manera permanente, la contradicción dialéctica entre cantidad y calidad, sobre todo en las transiciones de fase. Durante mucho tiempo acorde con los sistemas simples, la cuantificación se volvió casi una obsesión. Sin embargo, hoy con el paradigma de la complejidad, será posible utilizar herramientas que nos permiten una aproximación más de índole cualitativa, sin hacer a un lado los aspectos cuantitativos. De hecho, podremos estudiar las dinámicas de los sistemas complejos, a nivel multi-escala, con el fin de conocer las propiedades emergentes que son producto de la interacción de sus componentes para encontrar en ellas no sólo respuestas complejas, sino también respuestas simples y, como plantea Leo Kadanoff, lograremos explicarnos comportamientos complejos con ideas muy básicas. Pero además encontraremos seguramente información que nos permitirá incidir en parámetros de control para dar respuesta a diversos problemas.

POR LA RUTA DE LA COMPLEJIDAD

Nos hemos propuesto inicialmente aproximarnos a los sistemas de salud en tres niveles: el análisis de una estructura clave del sistema de salud en la organización, la atención al paciente a través del análisis del error médico y el análisis de la situación de los usuarios.

Para el primer análisis aplicaremos la variedad multiescala, que hace posible identificar la eficiencia funcional del sistema al considerar el conjunto de acciones que pueden llevarse a cabo en las diferentes escalas. En este caso la eficiencia estará determinada no sólo por el número de componentes sino por la coordinación entre

estas últimas. Este tipo de estudio nos permitirá observar los comportamientos emergentes y los subcomponentes que participan en dichas conductas, al ponderar la importancia relativa de los mismos.

Más aún, por medio de la simulación multiagentes, algoritmos genéticos y la red de mapeos acoplados será factible completar la información necesaria para conocer el sistema en su esencia, es decir su robustez. Adicionalmente se propone una estructura a manera de red compleja que dé cabida a la simulación del comportamiento deseado sin excluir la respuesta a las perturbaciones.

Se podrá concebir el error médico como una conducta emergente resultado de las interacciones de los componentes del sistema, de tal manera que para analizar su complejidad, se aplicará también la variedad multiescala y se utilizarán elementos como la redundancia, automatización y reducción de complejidad para propuestas de corrección.

En lo que atañe al conocimiento de la situación de los usuarios, se tomará en consideración la experiencia alcanzada en la Cruzada Nacional por la Calidad. Se podrán, además, agregar otros elementos, entre ellos un mayor acercamiento mediante la conformación de comunidades de práctica y la creación de puentes o interfases inteligentes, alrededor de enfermedades complejas, con el fin de aplicar el análisis de variedad multiescala, así como los modelos de simulación para construir redes que les confieran sincronía a los componentes más numerosos del sistema de salud. Aquí, también cabe la posibilidad de aplicar medidas que incidan en los parámetros de control de algunas enfermedades complejas, como lo planteó el Dr. Germinal Cocho en el libro *Las ciencias de la complejidad y la innovación médica*.

En estos tres casos se buscará: la topología adecuada de la red y la asignación de funciones a los componentes. Con las aproximaciones antes expuestas se iniciará la propuesta de reconceptualización de la calidad, así como las nuevas herramientas que contribuirán a garantizarla.

COMUNIDADES DE PRÁCTICA Y AYUDA MUTUA: LA PROBLEMÁTICA DEL PRIMER NIVEL EN EL SISTEMA DE SALUD.

Comunidades de práctica

Se definen como redes informales que coexisten con la estructura formal de las organizaciones y sirven para resolver conflictos entre las metas de la institución a la cual pertenecen, solucionar problemas del modo más eficiente y contribuir a que sus miembros alcancen sus objetivos.

A pesar de que no se les reconoce ni acepta, estas redes informales confieren a sus integrantes un sentido de pertenencia y pueden dar lugar a formas efectivas de aprendizaje. Pero además, si se les incentiva de manera adecuada se puede aumentar la productividad de la organización formal. Desde un punto de vista social, cuando surgen generan sus propias normas, patrones de interacción, con lo que constituyen lo que se ha denominado comunidades de práctica.

Cada miembro de una comunidad puede interactuar con varias personas, lo que da lugar a diversos patrones de interrelación, de conformidad con una estructura uniforme, en la que cada individuo se comunica con los demás, hasta una estructura en cúmulos en la que un sujeto colabora con un número pequeño de compañeros.

Si nos proponemos conocer cómo evolucionan estas comunidades y de qué modo las estructuras resultantes dependen del tamaño del grupo y de la diversidad de sus habilidades, deberemos tomar en cuenta que es posible propiciar que un individuo resuelva un problema mediante el intercambio de información con otros miembros de la comunidad, y que esta información, en general, no suele ser perfecta e incluso cabe la posibilidad de que resulte inadecuada para la tarea.

Cada sujeto tiene que aprender a identificar a los miembros de su comunidad con quienes la interacción puede ser más fructífera, y con frecuencia esto da por resultado un patrón en el cual la escala de interacciones crece con base en la percepción de la utilidad mutua. Se debe mencionar que dicho patrón casi nunca es estático, porque aunque el problema sea el mismo, conforme transcurre el tiempo son distintos individuos los que hacen contribuciones importantes.

Si tomamos en cuenta los puntos antes expuestos, podemos formular modelos matemáticos que consideren la diversidad y el tamaño del grupo, la estructura de la red cuando cambia a través del tiempo el número de sus integrantes y la estabilidad que ésta mantiene frente a las fluctuaciones. Es posible modificar la estructura al introducir un mecanismo de aprendizaje determinado que genere cambios locales, los cuales, a su vez darán lugar, de manera manifiesta, a un mayor rendimiento de la comunidad en su conjunto.

En estas comunidades, además, hay relaciones entre niveles jerárquicos o con otras instituciones del mismo nivel. Algunos ejemplos que ilustran esto y que tienen ciertas implicaciones positivas son las relaciones de familia, de amistad o las cofradías y grupos religiosos que comparten hábitos y creencias, los cuales muchas veces propician la creación de puentes que son más eficaces que los que derivan de relaciones formales. En contraste, existen otros casos en los cuales las comunidades de práctica, como las mafias delictivas, comprenden aspectos negativos. En conclusión lo importante es tener en mente que las relaciones humanas, más allá de las reglas formales, pueden ser un punto de partida para la resolución de muchos problemas.

Debemos agregar que, además de buscar soluciones y planteamientos generales en gran escala, es conveniente observar en la práctica a organizaciones experimentales, en pequeña escala, que permitan recopilar la información necesaria para encontrar soluciones generales.

Existen diversas publicaciones sobre cómo organizar comunidades de práctica. En particular resulta conveniente consultar: <http://www.icohere.com> (se pueden bajar la información): "Creating Communities for Collaboration and Learning", S. Kaplan y P. Bartlett; "Community of Practice: Design Guide (A step-by-step guide for creating collaborative communities of practice)."

Comunidades de ayuda mutua

Aunque, en general, se ha considerado que el intercambio recíproco es característico de las sociedades primitivas, como lo expone Kropotkin,³ este intercambio basado en la solidaridad, la confianza y la ayuda mutua, fue fundamental en los gremios y estructuras sociales de la Edad Media europea. Así mismo ha sido y es predominante en grupos sociales marginales que apenas sobreviven. El mismo autor comenta que esto se observó en la Inglaterra de finales del siglo XIX. También se ve en los grupos marginales de nuestras ciudades.⁴ Los estudios y experiencias sobre las comunidades de práctica pueden ayudar a establecer una mejor organización de las comunidades de ayuda mutua.

Por otro lado, aunque algunas sociedades actuales tengan resueltos los problemas de sobrevivencia, muchos de sus miembros son cada vez más ignorantes y menos creativos. En estos casos, se pueden proponer formas organizativas, tomadas o aprendidas de las comunidades de práctica, que potencien la creatividad individual y social.

Lo que se ha mencionado en párrafos previos habría que tomarlo en cuenta para hacer el análisis y diseño de los sistemas de salud, en particular a lo referente al primer nivel. En lo que atañe a éste, entre problemas que se consideran muy importantes, está la sobrecarga de expedientes de los médicos, los largos periodos de espera y el comportamiento, en muchas ocasiones arrogante de médicos y enfermeras, que en parte puede ser debido al exceso de trabajo. Además, dado que muchas veces los pacientes van en busca de comprensión, cariño o de apoyo psicológico se sienten desilusionados. Otro de los problemas es la "mala automedicación". Tal vez las comunidades de práctica y de ayuda mutua puedan encargarse de "brindar cariño", lo que aligeraría la carga de trabajo del personal médico, con la consecuente reducción de los tiempos de espera, que podrían utilizarse para presentar y difundir medidas profilácticas y procedimientos de "automedicación adecuados".

COMENTARIOS FINALES

En este capítulo, hemos comentado algunos aspectos de la interrelación entre la dinámica simple y la compleja en el campo de la salud. En particular, se ha hecho énfasis en la conveniencia de analizar el grado de complejidad de las diversas regiones y escalas que comprende el sistema de salud, con el fin de determinar cómo podrían servir los resultados de dicho análisis para mejorar tanto la eficiencia como la eficacia de los servicios que ofrece. Comentamos, así mismo, que los organismos biológicos operan en zona crítica, de lo que depende, en gran parte, su creatividad y adaptabilidad. Planteamos también la reconceptualización de los elementos clave de la calidad e iniciamos procesos para alcanzarla.

Expusimos también algo de la problemática del primer nivel de atención del

³ Kropotkin, P. 1989. *Mutual aid: A factor of evolution*. Montreal, Canada: Black Rose Books: 262-294.

⁴ Lomnitz, L. A. de. 1975. *Cómo sobreviven los marginados*. México: Siglo XXI: 25.

sistema de salud y explicamos de qué manera las comunidades de práctica y de ayuda mutua podrían contribuir a solucionar algunos de los problemas que no han podido ser resueltos.

Se debe tener en cuenta que muchas de las dificultades que enfrentan los sistemas de salud son inherentes al marco sociopolítico en que se desenvuelven. Es obvio que el conocimiento de la dinámica de los sistemas complejos no hará milagros. Hay que recordar que países con un marco sociopolítico diferente, como es el caso de Cuba, han podido resolver sus problemas de salud y “exportar” medicina y médicos.

ALGUNOS ASPECTOS DE LA INTERRELACIÓN CIENCIA-SOCIEDAD EN LA OBRA CIENTÍFICA DE EINSTEIN*

RESUMEN

EN este trabajo se discuten algunas de las características generales de las sociedades centroeuropeas en la época del Einstein joven y maduro, así como ciertos aspectos del medio local en que se forma científicamente. Se comentan algunos rasgos de su pensamiento científico y las relaciones entre éste y la problemática científica y social de la época que vivió. Asimismo, se contrastan los planteamientos y enfoques intuitivos de Einstein respecto de las concepciones científicas dominantes en Alemania durante el periodo de su residencia en el Wilhelm Kaiser Institut de Berlín.

INTRODUCCIÓN

Einstein nace en Ulm, Alemania en 1879, y cursa los estudios de enseñanza primaria y secundaria en dicho país; como ha sido mencionado con frecuencia, se rebela contra el sistema educativo alemán, jerárquico y autoritario. En 1894 su familia se desplaza a Italia; Einstein cursa la preparatoria en Aarau, Suiza, y en 1896 ingresa a la Escuela Politécnica Federal de Zurich para estudiar la carrera de maestro de física y matemáticas. En 1902 recibe el diploma y adquiere la nacionalidad suiza. Tras algunas vicisitudes y trabajos temporales, en junio de 1902 empieza a trabajar como técnico en la Oficina de Patentes de Berna, Suiza. En 1905 recibe el grado de doctor de la Universidad de Zurich con la tesis "Una nueva definición de las dimensiones moleculares". En 1909 es profesor supernumerario de la Universidad de Zurich; en 1910 es profesor de la Universidad de Praga y en 1912 regresa a Zurich. En 1913 se traslada a Alemania como profesor de la Universidad de Berlín y es nombrado miembro de la Academia Prusiana de Ciencias. Permanece en este país durante la Primera Guerra Mundial y la República de Weimar, desplazándose

* Ensayo escrito por Flavio Cocho, Germinal Cocho y Raúl Rechtman. Publicado en: Dirección General de Proyectos Académicos, CESU. 1984. *Germinal Cocho Gil. Imagen y obra escogida*. México: UNAM. Col. México y la UNAM. Aportaciones universitarias a la solución de los problemas nacionales. Publicado previamente en la revista *Testi & Contesti* núm 4, Ed. GV, Milán, Italia, 1980. Este artículo está basado en un trabajo presentado en "Un simposio einsteiniano", Universidad de Puebla, México, 25-27 de julio de 1979.

a los Estados Unidos en 1933, a raíz de la aparición y afianzamiento del nazismo en Alemania.

A lo largo de estos años realiza la parte más importante de su labor científica. En 1902-1904 lleva a cabo trabajos sobre los fundamentos generales de la mecánica estadística; en 1905 aparecen sus trabajos sobre el movimiento browniano, sobre el fotón y el efecto fotoeléctrico, sobre la relatividad especial y sobre la relación entre masa y energía. A partir de 1907 publica una serie de trabajos sobre la teoría de la relatividad general que culminan con su publicación de 1916, y entre 1907 y 1925 realiza investigaciones sobre la física cuántica (calores específicos, energía de punto cero y la fórmula de Planck, absorción y radiación de energía electromagnética por los átomos y la mecánica cuántica de gases monoatómicos).¹

Por el papel que juega Einstein en el desarrollo de la física moderna es importante analizar las influencias e interrelaciones entre su trabajo y el resto de las actividades sociales, lo que hemos llamado interrelación ciencia-sociedad en el título de este trabajo. Sin ser exhaustivo, queremos señalar algunos aspectos que influyeron en la formación de Einstein. Nos interesa también confrontar las posiciones de Einstein con aquellas dominantes en Alemania de 1913 a 1933.

EINSTEIN EN SUIZA

La formación académica de Einstein en Suiza, así como la realización de sus primeros trabajos sobre relatividad especial, física cuántica y relatividad general se llevan a cabo en una época de crisis de la síntesis clásica en que las contradicciones entre la mecánica newtoniana y la electrodinámica tendrán eventualmente una "resolución" con los trabajos de Poincaré y Lorentz y en que las dificultades con la radiación del cuerpo negro, calores específicos y química y radiactividad, conducirán a la física cuántica. Esta época es también de crisis social, basta mencionar las revoluciones en Rusia en 1905 y 1917, así como la Primera Guerra Mundial.

El clima de agitación y crisis social influyó sobre el joven Einstein durante su periodo de estudio en el Politécnico de Zurich y luego en la Oficina de Patentes de Berna. Como ha sido señalado por Feuer,² en la época en que Einstein se forma y vive en Suiza, este país da asilo a los refugiados de Europa centro-oriental; en él se entrecruzan los refugiados socialistas y anarquistas y en ese sentido basta señalar que Plejanov, Lenin, Trotsky y Rosa Luxemburgo, entre otros, encuentran refugio en Suiza. A las universidades suizas acuden mujeres de Rusia y otros países a seguir estudios universitarios que les era imposible cursar en su país de origen. Suiza, con su tradición de asilo a los refugiados políticos, alberga "islas rebeldes", que sin perturbar la vida en general tranquila y conservadora del país, representan las inquietudes revolucionarias de Europa y que contribuyeron posteriormente a la transformación de sus países de origen.³ El Politécnico de Zurich no

¹ Véase S. Bergia, "Einstein nel Centenario della Nascita: un Itinerario Essenziale attraverso l'Opera e la Critica", *Testi & Contesti*, 1, mayo 1979.

² L. S. Feuer, *Einstein and the Generations of Science*, Basic Books Inc. Publishers, Nueva York, 1974, Capítulo I.

³ Cabe señalar que el derecho de asilo, garantizado por la constitución suiza de 1848, era mante-

era una excepción y Einstein participó principalmente de esta atmósfera a través de su amistad con estudiantes extranjeros, entre ellos Federico Adler,⁴ estudiante activista en política.

Es una atmósfera reflejo de una Europa en crisis; es un ambiente en que se ponen en duda los diversos aspectos de la concepción del mundo dominante, en que se piensa que las estructuras económicas y políticas no tienen una validez absoluta sino relativa y correlacionada a una situación histórica dada, en que por un lado se enfatiza el cambio social y por otro se tiene en mente la existencia de leyes objetivas que rigen dicho cambio. Si a esto añadimos que Einstein realizó sus trabajos teniendo conocimiento de la problemática de la ciencia de la época, pero aislado o casi aislado del medio institucional, formando parte en Berna de la llamada Academia Olimpia, en que se discutía de ciencia, literatura y filosofía, no es de extrañar el carácter heterodoxo de muchos de los planteamientos de Einstein, su capacidad de cuestionar a fondo lo establecido, sin temor al derrumbe de leyes consideradas válidas durante decenas y centenas de años. Como señala Feuer, a la concepción del mundo de Einstein habrían contribuido, por un lado, el materialismo histórico de Marx con el énfasis en el cambio de las estructuras socioeconómicas a lo largo de la historia, la importancia del choque entre intereses y concepciones contradictorias y la existencia de leyes objetivas que rigen este cambio, y por otro, algunos de los planteamientos de la obra de Mach en que enfatiza la no validez absoluta de los conceptos físicos y el cambio de éstos a lo largo de la historia.

Un aspecto importante de la labor de Einstein es su utilización de principios y conceptos considerados irreconciliables, postulando la validez de ambos y siguiendo hasta el fin las consecuencias de dichos planteamientos. En su trabajo del movimiento browniano considera como discretas las micelas grandes y las moléculas del medio, mientras que al moverse las micelas en el medio lo trata como un

nido resistiendo las presiones del imperio alemán de Bismarck. Zurich en particular poseía una rica tradición socialista. En 1901 varios grupos se unieron para formar el Partido Socialdemócrata Suizo, y es en gran parte por esto que Suiza era el centro de reunión de los perseguidos políticos europeos. La principal organización socialista, el Grütli-Verein, había logrado una gran cantidad de prestaciones sociales a través de medios constitucionales. La legislación incluía leyes para la protección de los obreros, tribunales de arbitraje, centros vacacionales para niños y casas-habitación para trabajadores. En Zurich y Berna las sociedades cooperativas dominaban el comercio local.

⁴ Federico Adler era hijo del doctor Víctor Adler, líder del Partido Socialdemócrata Austriaco y estaba bien preparado en los principios del marxismo. Conocía también la filosofía de Ernst Mach y fue el líder de los marxistas-machianos. De él dice Lenin que era: "quizás el único escritor alemán que también siente deseos de completar a Marx con el machismo" (V. I. Lenin, *Materialismo y empiriocriticismo. Notas críticas sobre una filosofía reaccionaria*, Ed. Progreso, Moscú, pp.48-49). Cabe recordar que Anton Reiser, uno de los yernos de Einstein escribe: "Einstein aprendió bastante sobre las enseñanzas socialistas de su amigo Adler [...] Adler era no sólo un socialista y un físico, sino también un entusiasta filósofo [...] seguidor de la filosofía empiriocriticista de Ernst Mach [...] Adler pensaba que la ciencia natural debería provenir sólo de la experiencia". (A. Reiser, *Einstein, a Biographical Portrait*, Londres, 1931, pp. 76-77).

A su vez Adler decía: "Einstein tenía sentimientos netamente socialistas. Nunca estuvo afiliado al partido socialdemócrata ni al comunista. Celebraba el intento de llevar a la práctica el marxismo en Rusia [...] No conocía muy a fondo la literatura marxista, en ocasiones resolvía problemas de gran trascendencia de modo puramente intuitivo, a veces contradiciéndose a sí mismo". (F. Adler, en C. Seelig, *Albert Einstein*, Espasa Calpe, 1968, p. 121).

continuo hidrodinámico. Al discutir la relatividad especial considera tanto la validez simultánea de las leyes de la mecánica y del electromagnetismo en sistemas de referencia inerciales, como la constancia de la velocidad de la luz respecto a cualquiera de estos sistemas, y en sus investigaciones sobre física cuántica considera la validez paralela de la termodinámica y las hipótesis cuánticas (hipótesis cuántica de Planck o energía del punto cero). Otro ejemplo en ese sentido sería la validez simultánea de la concepción discreta de la materia y la energía y de su concepción del campo unificado.⁵ En estos planteamientos de hipótesis, consideradas contradictorias a veces, se habría llegado a una síntesis, como en el caso del movimiento browniano y la relatividad especial, y otras no, como en la física cuántica (según Einstein) y en lo referente a la unificación entre la naturaleza cuántica de la materia-energía y las teorías clásicas del campo.

En sus trabajos de 1905 Einstein muestra ser un científico intuitivo, cuyas ideas se originan en gran parte por analogía a partir de disciplinas o problemas diferentes, que utiliza principios y conceptos considerados irreconciliables y que trata de evitar las complicaciones del formalismo matemático. Es un enfoque diferente del axiomático, en que se considera que sólo hay verdad científica en la medida que sea expresable como verdad matemática y en que a partir de conceptos primitivos, axiomas no contradictorios y reglas de inferencia se derivan teoremas. Este enfoque axiomático presenta una condición estática frente al carácter dinámico de la realidad del mundo natural y la presencia de contradicciones intra e interteóricas de la práctica real del trabajo científico.

El enfoque de los problemas de la física del Einstein de esta época es coherente con las características de la atmósfera de las universidades suizas de la época, un ambiente en que, como decíamos anteriormente, se ponían en duda los diversos aspectos de la concepción del mundo dominante, en que se piensa que las estructuras económicas y políticas no tienen una validez absoluta, sino relativa y correlacionada a una situación histórica dada, y en que por un lado se enfatiza el cambio social y por otro la existencia de leyes objetivas que rigen dicho cambio.

EINSTEIN EN ALEMANIA

En 1913 Einstein es nombrado profesor de la Universidad de Berlín y miembro de la Academia Prusiana de Ciencias. Durante su estancia en Alemania llevó a cabo, entre otros trabajos, los referentes a la teoría de la relatividad general, que culmina con su artículo publicado en 1916. En esos trabajos plantea una síntesis del espacio, el tiempo y la materia.

En la concepción del mundo newtoniano nos encontramos con un espacio separado de la materia y que existiría en ausencia de ella. En este espacio neutro, que

⁵ En su ensayo "On the Method of Theoretical Physics", 1933, Einstein comenta: "La mayor dificultad a que uno se enfrenta en una teoría de campo de este tipo está asociada a la concepción de la estructura atómica de la materia y la energía. La teoría es esencialmente no atómica, ya que opera exclusivamente con funciones continuas del espacio, en contraste a la mecánica clásica, cuyo elemento más importante, el punto material, en sí mismo hace justicia a la estructura atómica de la materia". (A. Einstein, *Ideas and Opinions*, Crown Publishers, Inc., Nueva York, 1954, p. 275).

no sufre la influencia de la materia, los objetos permanecerían en reposo o en movimiento rectilíneo uniforme en ausencia de fuerzas; recíprocamente, si un objeto no está en reposo o en movimiento rectilíneo uniforme, una fuerza estaría actuando sobre dicho objeto. En Newton, espacio, tiempo y materia son independientes unos de otros y tienen aspectos metafísicos. Sin embargo, esta separación entre espacio y materia no se presenta en otras concepciones del mundo, como es el caso de la cosmología y física aristotélicas y en algunos aspectos de las filosofías hindú y china.

En el universo geocéntrico de Aristóteles⁶ la materia y el espacio son lo mismo y no hay vacío; el espacio no es homogéneo e isótropo y los “movimientos naturales” serían el circular alrededor del centro de la Tierra y el radial hacia dicho centro.

En la filosofía hindú⁷ el espacio es uno de los elementos que forman la materia, y en la filosofía china⁸ interaccionarían Tierra, cielo y sociedad, y el vacío es una fuerza viva.

Vemos pues que la unión entre espacio y materia de la concepción einsteiniana la encontramos, aunque con características diferentes, en otras culturas y sociedades.

Dentro del marco de la Europa moderna y de la formulación de las geometrías no euclidianas encontramos concepciones similares. Lobachevsky,⁹ y sobre todo Riemann, hablan de las posibles geometrías del espacio y de que la curvatura de este espacio podría depender de los fenómenos que en él suceden.

En la memoria “Sobre las hipótesis que sirven de fundamento a la geometría”,¹⁰ presentada por Riemann en Göttingen en 1854, se menciona:

El problema de la validez de las hipótesis de la geometría en lo infinitamente pequeño está ligado al problema del principio íntimo de las relaciones métricas en el espacio. En este último problema, que muy bien se puede considerar como perteneciente a la doctrina del espacio, se encuentra la aplicación de la observación anterior, que nos dice que en una variedad discreta el principio de

⁶ Ver, por ejemplo, T. S. Kuhn, *The Copernican Revolution*, Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1957.

⁷ Chang Wing-sit et al., *Filosofía del oriente*, Breviarios del Fondo de Cultura Económica, México, 1950, p. 54.

⁸ *Ibid.*, p. 109.

⁹ En la introducción de su libro *Nuevos principios de geometría* (1835-1838), Lobachevsky menciona: “considerado esto, no puede haber en nuestra mente ninguna contradicción al suponer que ciertas fuerzas de la naturaleza siguen una geometría y otras, otra geometría suya particular. Para aclarar este concepto supongamos (y de esto muchos están convencidos) que las fuerzas de atracción se debilitan, por la difusión de su acción sobre las superficies esféricas. En la geometría ordinaria se toma la magnitud de la superficie esférica igual a $4\pi r^2$, en correspondencia del radio r , de donde se obtiene que la fuerza tiene que disminuir proporcionalmente al cuadrado de la distancia. En la geometría imaginaria yo encontré que la superficie de la esfera es $\sim (a^r - a^{-r})^2$ y puede ser que las fuerzas moleculares siguen esta geometría y entonces toda particularidad de esas fuerzas dependerá del número a siempre muy grande”.

De este comentario es clara la preocupación de Lobachevsky de relacionar la geometría no euclidiana con los fenómenos moleculares.

¹⁰ Esta memoria se publicará trece años más tarde, en 1867, en *Las memorias de la Sociedad Real de Ciencias de Göttingen*. El párrafo es una traducción al español de la traducción al francés de las obras de Riemann por J. Hovel.

las relaciones métricas está ya contenido en el concepto de esta variedad, en tanto que en una variedad continua este principio debe venir del exterior. Es pues necesario, o bien que la realidad sobre la cual se funda el espacio forme una variedad discreta, o bien, que el fundamento de las relaciones métricas sea buscado fuera de él, en las fuerzas de ligación.

Vemos pues que para Riemann *la métrica del espacio depende del lugar, de los cuerpos ahí considerados, incluso de las interacciones físicamente ahí consideradas*; la limitación riemanniana es que esto se plantea para lo “incommensurablemente pequeño” y no como hiciera Einstein para lo “muy grande”. Pero este último comentario no quita ni un ápice de importancia al aporte riemanniano, al haber, a mediados del siglo XIX, prefigurado ya conceptualmente aspectos importantes de la relatividad general, a lo que habría que añadir que desarrolló algunas de las técnicas matemáticas de la geometría diferencial.

¿Por qué Riemann enfatiza la interrelación entre materia y espacio para lo muy pequeño y no para lo muy grande? En la primera mitad del siglo XIX la mecánica celeste avanzaba sin problemas, se descubre el planeta Neptuno, se mide la distancia de la Tierra a algunas estrellas y surge la espectroscopia astronómica. La astronomía parecía avanzar cuantitativamente sin dificultades importantes y la mecánica newtoniana reinaba sin ser cuestionada. Sin embargo, en lo referente a la estructura microscópica de la materia, el panorama era muy diferente. Aunque los trabajos de Dalton, Avogadro y posteriormente Canizzaro, Boltzmann y Maxwell apoyan la teoría atómica de la materia, el problema estaba lejos de ser claro; no había prueba experimental directa y físicos como Mach y Ostwald negaron dicha estructura atómica hasta finales del siglo XIX. Los trabajos sobre la conservación de la energía y sobre la teoría electromagnética abrían nuevos panoramas en la física. Vemos, pues, que a diferencia de la astronomía, la física de lo muy pequeño estaba lejos de parecer algo estabilizado.

Cuando en esta época fluida de mediados del siglo XIX, de revoluciones sociales fallidas y de escuelas matemáticas autónomas,¹¹ se propone ligar las propiedades geométricas del espacio con la materia y fuerzas locales, era natural se dirigiese la atención a la física del micromundo y no “a lo muy grande”. Por otro lado, cabe recordar que los trabajos sobre geometría no euclidiana de Lobachevsky y del intuitivo Riemann fueron considerados heterodoxos en su época y recibieron muy poca atención. (Riemann realizó investigaciones no sólo en matemáticas sino en física, y en esta disciplina se originaron muchas de sus ideas; cabe señalar que su trabajo sobre tensores está inmerso en una investigación sobre el calor. Riemann es un matemático intuitivo cuyas ideas se originan en gran parte por analogía a partir de otras disciplinas; se define explícitamente contra Kant y “lo a priori” y a favor de la experiencia como creadora de la invención).

¹¹ En lo referente a disciplinas autónomas durante el siglo XIX podemos mencionar el álgebra (Galois y Abel); el análisis (Weierstrass, Dedekind y sobre todo Riemann) y la geometría (Bolyai, Gauss, Lobachevsky y Riemann). Esto contrasta con los intentos de una “unificación algebrizada” por F. Klein en el Programa de Erlangen de 1872 y por D. Hilbert en los 20 axiomas de los *Fundamentos de la Geometría*, 1898.

En la época en que Einstein desarrolla la teoría de la relatividad general las concepciones del espacio, el tiempo y la mecánica clásica habían sido modificadas e indirectamente la concepción newtoniana de la gravitación y del universo habían perdido su “carácter sagrado”. (¡Es el mismo Einstein quien en la relatividad especial hace saltar las concepciones clásicas!)

Vemos, pues, que sin pretender restar méritos al trabajo de Einstein, sus ideas tienen precedentes importantes. Aunque Riemann trata de unificar espacio y materia para la física de lo microscópico y no intenta geometrizar la gravitación como hace Einstein, su planteamiento es un precedente importante y cabe señalar que algunas de las herramientas matemáticas que utilizan Einstein y Grossman en su trabajo de 1913 se deben a Riemann.

Einstein, en su ensayo de 1934,¹² “El problema del espacio, el éter y el campo de la física”, señala el papel pionero de Riemann:

Sólo el genio de Riemann, solitario e incomprendido, había recorrido el camino, a mediados del siglo pasado, hacia una nueva concepción del espacio, en la cual el espacio pierde su rigidez y se reconoce la posibilidad de que participe en eventos físicos.

[...] Así, el campo gravitacional se determina por la configuración de masas y cambia con él; la estructura geométrica de este espacio depende también de factores físicos. De acuerdo con esta teoría, el espacio —como Riemann había adivinado— deja de ser absoluto; su estructura depende de las influencias físicas.

La relatividad general resultó extraña a la comunidad científica de la época, y aunque Einstein había publicado a partir de 1911 una serie de trabajos sobre el tema, es sólo a partir de 1915 que Hilbert se interesa en ella, contribuyendo a la forma final de la teoría.¹³ Algunos de los rasgos de la sociedad alemana de la época ayudan a comprender estos hechos.

Al unificarse Alemania políticamente en la segunda mitad del siglo XIX, la segunda revolución industrial alemana no sólo tendrá que vencer su atraso o “desventaja inicial”, sino que se enfrentará a un sólido competidor industrial inglés ya presente, y necesitará objetivamente de una política institucional (centros estatales de investigación y orientación de la enseñanza superior hacia la enseñanza científica y técnica del recién unificado estado alemán) orientada a modernizar (hacer capitalísticamente competitivo y así superar al caso inglés) el aparato productivo industrial. A su vez, éste implicaría en el caso alemán un salto cualitativo a nivel tecnológico, en el aparato productivo industrial, y con ello el surgimiento de todo un conjunto de problemas técnicos para cuya explicación la ciencia mecanicista de la época no tenía capacidad. A tan abigarrada multitud de problemas técnico-científicos insoslayables (el caso de la industria química será ilustrativo de esto) y en conexión con la política institucional académica y de investigación del

¹² A. Einstein, *Ideas and Opinions*, Crown Publishers Inc., Nueva York, 1954, pp. 281, 285.

¹³ J. Mehra, *Einstein, Hilbert and the Theory of Gravitation: Historical Origins of General Relativity Theory*, Reidel, 1974; J. Earman y C. Glymour (1978), “Einstein and Hilbert: Two Months in the History of General Relativity”, *Archive for History of Exact Sciences*, 19: pp. 291–308.

estado unificado alemán se responderá global y abstractamente, creando o intentando crear una “ciencia global” (la física cuántica y las matemáticas a la Hilbert serían ejemplos paradigmáticos de esto) capaz, por eso mismo, de dar respuesta a todo problema posible. Por otro lado, la ideología alemana totalizante de la época,¹⁴ incluyendo la concepción del “estado fuerte” alemán, será coherente con una matemática abstracta y deductiva, con la axiomática de Hilbert.

Se comprende, pues, que los planteamientos intuitivos de Einstein resultaran extraños al pensamiento matemático axiomático y que fuera Einstein, y no la escuela axiomática de Göttingen, quien plantea el problema de la relatividad general. Aunque, como señalan Earman y Glymour,¹⁵ en los meses de octubre y noviembre de 1915 tuvo lugar una correspondencia intensa entre Hilbert y Einstein respecto al problema de la relatividad general, y los resultados de Hilbert pudieron haber contribuido a la versión final de la teoría; se trató más bien de desarrollos matemáticos una vez que el problema había sido planteado y parcialmente resuelto.

Sobre el carácter intuitivo de los planteamientos de Einstein en esa época, Weyl comenta que en 1918, y refiriéndose a la utilización de la invariancia de norma como puente entre la gravitación y el electromagnetismo, Einstein le dijo: “Nada, Weyl, ¡dejemos eso! Así –es decir, de un modo tan especulativo, sin un principio físico intuitivo que oriente– no se hace física”.¹⁶

Respecto al método axiomático, Weyl comenta lo que Einstein le dice en una carta de noviembre de 1916:

... confieso de buen grado que la búsqueda de la hipótesis adecuada, o sea la función de Hamilton para la construcción del electrón, constituye una de las tareas actuales más importantes de la teoría. Pero el *método axiomático* puede servir de muy poco aquí...¹⁷

Vemos, pues, que al menos hasta 1918, a pesar de su estancia en Alemania, Einstein sigue siendo el intuitivo heterodoxo y cuestionador formado en la comunidad rebelde de Suiza y no un científico axiomático a la Hilbert.

Más tarde, en la segunda mitad de su vida, se acentúa su visión panteísta del mundo, y su concepción del “dios de Spinoza” como una armonía de la naturaleza, y su pensamiento se vuelve menos intuitivo y más formal.

El control de gran parte de Europa por el fascismo y la filosofía irracional imperante fueron quizá factores importantes en el campo hacia un Einstein que se refugia en la armonía de la naturaleza, lejos del “mundo terrestre irracional”.

¹⁴ Cabe citar la influencia de Kant y la idea de “juicio sintético *a priori*”; la idea de un *método* lógico-deductivo *a priori* sería coherente con la matemática abstracta y deductiva de Hilbert. La influencia envolvente de la filosofía de Hegel y su teoría del estado burgués moderno, que se verá plasmado en la unificación alemana alrededor de Prusia y el nacionalismo totalitario de Fichte son otros factores dignos de mención.

¹⁵ J. Earman y C. Glymour, *ibid.*

¹⁶ C. Seelig, *Albert Einstein*, Espasa Calpe, 1968, p.195.

¹⁷ *Ibid.*, p.197.

CIENCIA, SOCIEDAD E IDEOLOGÍA EN EL CAPITALISMO *

1. ALGUNAS CARACTERÍSTICAS GLOBALES DEL CAPITALISMO CONTEMPORÁNEO

Construir una alternativa revolucionaria pasa por una crítica radical de todas las manifestaciones del capitalismo.

A ese respecto, hoy día, hay tres aspectos del capitalismo que quisiéramos señalar:

a) El carácter destructor de la sociedad capitalista

A este respecto creemos que más elocuente que el capitalismo no lo pudiéramos ser nosotros mismos: los dos informes del Club de Roma indican que, de seguir el actual desarrollo de la sociedad humana (capitalista) se corre el peligro de aniquilar la biosfera, el hábitat terrestre, en un plazo no mayor a cien años: agotamiento de materias primas, subproducción alimenticia y aumento demográfico, contaminación ambiental, etc., es la tendencia actual y, ciertamente, no es exorcizando a la sociedad humana contra el “catastrofismo de las profecías del capitalismo” que, en un mundo finito como el nuestro, se invalida tal tendencia de hecho. Por cierto que el desarrollo del complejo militar-industrial capitalista, otro hecho, puede encargarse de acortar el plazo de nuestra vida en nuestro planeta: el 10 de noviembre de 1979 una “falsa alarma nuclear”, “error de computadora”, del Comando de Defensa de América del Norte, en Colorado Spring, estuvo a punto de desencadenar el holocausto nuclear. Einstein decía que si estallaba la tercera guerra mundial, la cuarta sería con hachas de piedra.

El pensar que el “instinto innato de conservación” del capitalismo le permitirá sin *extremis* preservar la especie humana como medio inevitable de preservarse a sí mismo, haciendo a un lado el carácter destructivo de la acumulación capitalista, no pasa de ser un dogma de fe digno de mejor causa, del dominio de la ficción científica.

b) El incremento de la desigualdad social

Giovanni Rossi “La science des pauvres”, revista *La Recherche*, no. 30, nos decía en 1973, al analizar la desigualdad social, que:

* Ponencia escrita por Flavio Cocho Gil y Germinal Cocho Gil, presentada en el Simposio Internacional de Ciencia y Sociedad que tuvo lugar del 26 de noviembre al 14 de diciembre de 1979. Publicada en: Cepeda Flores, F. (ed.), 1984. *Revalorización social de la ciencia*. México: Programa de Ciencia y Sociedad, Facultad de Ciencias, UNAM.

La diferencia entre el nivel de vida, en 1770, entre países desarrollados y países subdesarrollados, apenas era del 20%. En 1860 del orden de 1 a 5, en 1900 de 1 a 6: entre la primera revolución industrial alemana la desigualdad se ha multiplicado por seis. En 1929, la “gran crisis” (también época de la concentración monopolista acelerada), se pasa a una relación de 1 a 7. En 1953 de 1 a 9.5, en 1965 de 1 a 12... en nuestros días de 1 a 16.

El Banco Mundial dice en 1971: “la diferencia entre ingresos por habitante de los países ricos y los países pobres crece constantemente tanto desde el punto de vista relativo como absoluto...” La brecha entre ricos y pobres se abre constantemente.

Pero lo mismo sucede al interior de cada país capitalista. Veamos el ejemplo de un país periférico del capitalismo como México.

En 1976, 600 familias poseen fortunas entre 30 y 40 millones de pesos y 300 familias poseen fortunas de centenares de millones de pesos. 100 familias poseen fortunas del orden de miles de millones de pesos.

Por el contrario, sólo el 34% posee trabajo para (mal) vivir; un 33% vive en condiciones infrahumanas (450 ciudades perdidas).

Corresponde esta situación social, datos de 1970, a un control capitalista monopolístico del tipo siguiente: 141 empresas monopolísticas controlan el 60% de todas las ramas industriales del país, con un 80% de capital norteamericano. En la medida de que esta concentración monopolística y esta dependencia externa crece, los abismos sociales crecen.

En cuanto a los países “ricos” del capitalismo, el mismo ejemplo de Estados Unidos es ilustrativo. H. Braverman, en *Trabajo y capital monopolista*, nos dice:

De acuerdo con los datos de Marx, la lista oficial de indigentes en Inglaterra y Wales en 1865 fue de 971,433 y entonces se contaba con una población de alrededor de 20 millones según el censo de 1861, por tanto, el pauperismo oficial lo constituían el 4.6% de la población. En los EUA la cosa más cercana a una lista oficial de indigentes es el registro de los que requieren asistencia social. En 1973, este registro contenía 14.8 millones de personas sacadas de una población total de 210.4 millones o el 7% de la población...

Aumento pues de miseria, en el tiempo, respecto a su homólogo inglés.

En 1970, la Oficina de Estadísticas Laborales de EE.UU. señala, en New York, un subempleo del 39.9% de la población neoyorkina total, correspondiendo al 66.6% de la fuerza de trabajo disponible.

Ese año, el *New York Times Magazine* señalaba: “en 1970, en toda la nación, el desempleo sumó hasta el 4.9% de la fuerza de trabajo, desde entonces ha estado rondando en cerca del 6% mes tras mes. De acuerdo con la encuesta ECE (Censo de Empleo, EE.UU.) en las áreas centrales de las ciudades el promedio de desempleo en 1970 fue de 9.6%...”

En cuanto a las minorías sociales marginadas, los franceses Ertel, Fabre y Marienstras, decían en 1971: “el ingreso medio familiar, en 1970, de una familia negra es de un 60% de la correspondiente a la blanca. En tanto que el 8% de las familias

blancas tienen un ingreso insuficiente para vivir, en el caso negro es de 29%". Esto es, abismos sociales crecientes que también pasan por la discriminación racial.

Así pues, el desarrollo del capitalismo conlleva el aumento de la desigualdad entre países, y al interior de *todo* país capitalista.

c) La manipulación del proceso de actividad-aprendizaje

Harry Braverman decía (obra ya citada) que si hoy, en el capitalismo, no se habla tanto de taylorismo se debe a que hoy toda la actividad humana tiende ya a estar taylorizada: un hecho natural y masivo ya no se detecta.

Según Braverman, esta concepción de la actividad humana práctica, cabe decir, se extiende fundamentalmente en los países industrializados, del aparato productivo industrial a los circuitos de circulación y distribución de mercancías. El artífice técnico de tal uniformización taylorista de la actividad humana sería la informática, su elemento técnico la computadora. En esa medida toda la sociedad tiende a homogeneizarse e identificarse, no tanto ya por el hecho de la explotación social en sí, sino por la forma como ésta se realiza.

Bastan algunos datos para comprobar lo anterior (F. Cocho, *Actividad, aprendizaje y capitalismo*. Ed. Nuestra Cultura, Madrid, en prensa):

En la industria norteamericana, en 1959, apenas se utilizaban 12 computadoras en control productivo; ya en 1964 se pasa a 500... en 1970 ya se emplean 12 mil con "funciones especializadas", en tanto que 62 mil 500 van dedicadas al control de la circulación y distribución de mercancías. Otros países capitalistas desarrollados no escapan a esa lógica:

	Número de computadoras
Rep. Federal Alemana	6 100
Gran Bretaña	5 900
Francia	4 500
Italia	2 700
Península Escandinava	1 500

La computadora pasa a ser así la máquina capitalista. Quien la controla (grandes monopolios tipo IBM), quien controla la información controla la sociedad capitalista.

Por esta razón se habla hoy de que el capitalismo desarrollado tiende a sustituir el control del "flujo de energía y materiales" (la industria tradicional) por el control de "la información": la industria tradicional tendería a desplazarse (vía la exportación de capitales) a los "países en vías de desarrollo", permaneciendo el control informático en las ciudades del capitalismo desarrollado.

Por construcción, la computadora es una "máquina secuencial taylorizada" (incluso "su concepción teórica", en 1935, de un Turing, se plega a esa norma), y taylorizante respecto del ser humano que con ella trabaja: una cosa es la operación de proporcionar "datos relevantes" (de acuerdo al instructivo y en lenguaje que dicta la casa constructora... la IBM por ejemplo), otra diferente y posterior, su lectura en "órgano de lectura" adecuados (*idem.* comentario que antes), otra más, diferente

y secuencialmente posterior, las operaciones que realiza un “órgano de mando”, otra más y también diferente y secuencialmente posterior la “ejecución del programa”... todo lo que, a su vez, produce la superespecialización del operador, el especialista en programación, el especialista en diagramas de flujo, etc. Taylor a nivel de informática.

Se habla hoy, en ese campo, de “electrónica distribuida”, una especie de “descentralización” de la computación. Pero de lo que se trata, en realidad, es de la descentralización de los órganos de alimentación de datos, datos que son centralmente procesados, esto es, controlados por el capital. Es muy significativo en nuestros días la tendencia a instalar “redes de información distribuidas geográficamente”... que tienden a constituir un super “banco de información” controlado centralmente por el gran capital. Todo en aras de la supuesta disponibilidad de la información al servicio de “toda” la sociedad.

Los medios de comunicación de masas en sí, otro renglón de la transmisión unidireccional de información, adolecen de un defecto análogo, reiteradamente señalado en más de un congreso internacional: son emisores centralizados de información (controlados por quien tiene el suficiente capital para construirlos, centros de “gran densidad de capital”) hacia la gran masa social... pero la operación inversa resulta imposible (el control del emisor por parte del receptor); nos dicen los especialistas del ramo que la imposibilidad es propiedad constructiva de los medios de comunicación actuales. No se trata de un problema político-administrativo. Es un problema de la tecnología capitalista en sí.

Que en estas condiciones de taylorización y control del proceso por parte de la minoría social capaz de grandes inversiones de “alta densidad de capital”, se produzcan los fenómenos de enajenación social tan mencionados en nuestros días, resulta una obviedad. Amplificada en una época en que incluso toda información se ha transformado en mercancía masiva.

En última instancia la justificación capitalista se resume en la palabra “eficiencia”. Esto es, en la capacidad de aumentar la producción de mercancías por unidad de tiempo: desde un zapato, hasta una poesía, o un poster del Che Guevara o bien un artículo científico de “reconocido prestigio”. Requisito básico de la acumulación capitalista, por lo que la práctica taylorista de la actividad humana pasa a ser una propiedad de estructura del capitalismo.

Se pretende que hoy exista un cierto relajamiento de la práctica taylorista, lo que sólo es la puesta en marcha de la vieja doctrina de principios de siglo del norteamericano Elton Mayo: conceder cierta autonomía local al ser humano, por ejemplo, dejar a su “libre albedrío” tres o cuatro operaciones de montaje de un aparato telefónico, sin que por ello se comprenda el porqué de las operaciones anteriores o posteriores a las suyas, ni dejen esas “operaciones autónomas” de integrarse en una cadena secuencial de muchas más, sobre las que desconoce su objetivo final, resultando utópico todo control colectivo.

En la medida en que el capitalismo sea cada vez más capaz de controlar globalmente, en forma centralizada, los destinos de la sociedad... puede concederse el lujo de dar “autonomía local” (y no sólo a nivel productivo industrial); incluso

con ello “asimila perturbaciones sociales” eventuales. Pero esto no es sinónimo de relajamiento del taylorismo, es su consolidación modernizada.

Pero esto último, en tanto que propiedad de estructura del capitalismo, afecta toda actividad humana. Nos limitaremos a dos ejemplos tipo:

El Proyecto Manhattan de construcción norteamericana de la bomba atómica, a fines de la segunda guerra mundial, inaugura la forma o modo contemporáneo de producir ciencia que conocemos: actividad científica superespecializada y desconocedora de cualquier otra fuera de su dominio de acción, conexión secuencial de diferentes actividades cuyo objetivo social se desconoce, carrera contra el tiempo ligada a una producción de resultados científicos acelerada (el argot popular la llama hoy “publicitis”); esto es, en el sentido ya mencionado, máxima eficiencia productiva. Este modo contemporáneo de producir ciencia, va acompañado del fenómeno de la enajenación del científico: confundir el fin social de su actividad con su superespecializada actividad “en sí”, culto a la neutralidad social de la ciencia “en sí”, etc. Esto es, transformación del científico en el taylorizado intelectual orgánico del capital, una especie de robot contemporáneo.

El segundo ejemplo creemos es aún más grave: incluso las organizaciones de izquierda, las organizaciones políticas de clase que luchan contra el capitalismo, por el mismo hecho de haber luchado largo tiempo en su seno adquieren “propiedades de estructura” del sistema capitalista que las enmarca. Vemos así irse consolidando, a “nivel organizativo interno”, la siguiente cadena secuencial, taylorista, a nivel político:

dirigentes → *órgano de decisión* →
 → *correo de transmisión de la información-consigna* →
 → *cuadro intermedio* → *ejecutor: base de masas*

...separación entre concepción y ejecución, entre trabajo manual e intelectual, proceso eficiente en la producción de “decisiones políticas” por unidad de tiempo, que consolida al sistema capitalista. El eurocomunismo contemporáneo parece ser un buen ejemplo de cómo un medio se transforma a sí mismo en fin. No en vano la noción de organización política es una de las más debatidas de nuestro tiempo. Problema, por cierto aún no resuelto. Pero en la medida en que la forma de actuar no es separable de la concepción con la que se actúa —no existe lo no intelectual como dijera Gramsci— todo lo anterior va acompañado por la propagación de toda una ideología social, que convenga al capital y justifique “científicamente” todo lo dicho, que atañe a la concepción del aprendizaje. En última instancia se trata de una concepción global y burguesa, a escala de toda la naturaleza, que se inculca a todo lo ancho y largo de la sociedad capitalista.

Algunos ejemplos son pertinentes:

A nivel de psicología del aprendizaje, el caso de la práctica capitalista norteamericana del conductismo: el cerebro humano es interpretado y “actuado” como una caja negra cuyo *output*, efecto buscado, sería reflejo lineal de estímulos o señales adecuadas. El infantilismo político de la sociedad norteamericana (no de quien la controla) parece ser, en parte, resultado de un monumental lavado de cerebro de este tipo.

A nivel de la concepción de progreso, en términos de la evolución (económica, política, biológica, etc.) la filosofía taylorista se propaga concibiendo (e inculcándolo) la anterior como un proceso secuencial, lineal y fatalmente exhaustivo de “cada paso”, único... de tal suerte que, por ejemplo, de la anterior ideología en términos biológicos se desprendería la “prueba científica” de que cada modo de producción social, por ejemplo el capitalista, debe “agotarse hasta sus últimas consecuencias” históricas antes de poder abordar un paso posterior: tal “ciencia” llevaría a la conclusión de que es necesario, “por hoy y hasta que nazcan las condiciones objetivas” (sinónimo de fatalidad histórica), desarrollar el capitalismo, hacerle superar sus “crisis nacionales”, establecer el “pacto social”, etc.

A mencionar también el sacrosanto dogma de la ciencia neutra socialmente, en tanto que “en sí” (su “metodología científica”, su “contenido en sí”): las concepciones culturales del capital, estatuidas en “ciencia neutral”, y por tanto en árbitros “imparciales”, se inculcan en forma indolora: así todos “nuestros centros académicos” se encargan, mayoritaria y aplastantemente, de tal tarea.

Se llama esto manipulación social, masiva, de TODO lo que puede comprenderse en la doble palabra actividad-aprendizaje.

En tales términos una tercera conclusión elemental se impone: el sistema capitalista, la civilización capitalista valdría decir, son sinónimos de manipulación ideológica (cultural, etc.) a TODOS los niveles, de TODA la sociedad... fenómeno quizás tan grave como el de la destrucción de la biosfera mencionado inicialmente.

Los hechos de que el capitalismo, al desarrollarse, tienda a destruir físicamente la especie humana, de que con él crezcan las desigualdades sociales entre naciones y al interior de las mismas, y que sea sinónimo de manipulación ideológica y castración cultural crecientes, a todos los niveles sociales, nos llevan, a juicio nuestro, a tres conclusiones mayores:

1. La NECESIDAD del cambio social (revolucionario): ya no es problema de perseguir utopías sociales, “hoy no practicables e idealistas”, *se trata de una cuestión de supervivencia social*.
2. La necesidad de la TOTALIDAD del cambio: en un sistema tan estable, tan maravillosamente autorregulado como el anterior, un cambio local, a un sólo nivel (político, económico, ideológico) sería, “autorreguladamente” rápidamente asimilado por TODO el sistema... la frase popular “que algo cambie, que todo permanezca” sería el resultado al que se llegaría (y se ha llegado en más de un caso histórico).

(Nota: El capitalismo contemporáneo, el análisis lo muestra, forma un “sistema cibernético autoconsistente”, a todos los niveles de su organización social. En el mismo sentido que, en un sistema biológico, innumerables homeostatos biológicos, desde moleculares a pluricelulares, tienden a estabilizar y a mantener con vida al sistema, en las más variadas y adversas condiciones).

3. La necesidad de que la totalidad del cambio NO SEA ESPONTÁNEO, esto es, que no se interprete como unicidad del cambio en base al mero rechazo de la situación existente: el espontaneismo en la lucha de clases implica dejar al azar el camino a seguir, aún si se toma en cuenta un factor local como las condiciones eventuales y concretas de lucha, lo que a su vez implica un razonamiento por postulado del tercero excluido: si se rechaza en la práctica concreta la sociedad existente, dejando al “azar espontáneo la lucha de clases” el camino futuro a seguir, se piensa implícitamente que el “único” camino que surgirá será, *a fortiori*, la sociedad sin clases sociales del futuro. Implica esto último dos errores: uno, olvidar que el “azar social” por mil caminos “autorregulados” diferentes (económicos, políticos, ideológicos), lo controla el capitalismo; dos, que en un sistema tan complejo como el capitalismo, un verdadero homeostato social de defensa de los intereses de clase de la burguesía, la defensa de tales intereses puede, ante situaciones adversas variadas posibles, llevar a futuras situaciones, varias y diferentes a la actual, para la mejor defensa de lo esencial... La negación del capitalismo, aún siendo en forma militante y concreta, si a eso sólo nos limitamos, no lleva necesariamente al socialismo.

Pero un cambio social que es necesario, que debe ser total y que no es posible dejarlo a la espontaneidad de la lucha (sin recurrir a Lenin, un mismo Jean-Paul Sartre nos dice que la lucha de clases sólo existe cuando hay lucha consciente, “espontáneamente” sólo existe la explotación social de clase a secas... añadimos nosotros que, o bien el tipo de lucha de clases y bajo los objetivos sociales que nos imponga y convengan al capital) obliga a tener una concepción global, no sólo de lo que rechazamos, sino de lo que queremos construir, y del cómo intentar llegar a ello, concepción histórica (todas lo son en la medida en que son sociales) que norme nuestra práctica.

O la alternativa “a futuros” se encargará de construirla el capital... de hecho ya lo hace. Un ejemplo es significativo: en 1973 la “Comisión Trilateral” decía haberse constituido por: “...ciudadanos privados de Europa Occidental, Japón y Norteamérica para promover una cooperación más estrecha entre esas regiones acerca de problemas comunes...” (*Report on the Governability of Democracies to the Trilateral Commission*, New York); ciudadanos “privados” tales como Jimmy Carter, Walter F. Mondale, Zbigniew Brzezinski, Cyrus Vance, por Estados Unidos; el primer ministro francés, Raymond Barre; el presidente de la Cámara de Comercio germanooccidental, Otto Wolff von Amerongen; el presidente de la Confederación Belga de Sindicatos Cristianos, Jozef P. Houthuys; el presidente de la FIAT, Giovanni Agnelli; y así sucesivamente, quienes por boca de Ralf Dahrendorf (“Observaciones de Ralph Dahrendorf sobre el estudio hecho acerca de gobernabilidad”, Apéndice I, *Terreno de actuación* del reporte de la Trilateral), decían:

debemos, sobre todo, mantener esa flexibilidad de las instituciones democráticas que, de algún modo, constituye su virtud mayor: su capacidad para iniciar y llevar a cabo cambios reales SIN REVOLUCIÓN...

Hay algo más que resaltar en la cita anterior: *para el capital*, TODO cambio “sin revolución” es aceptable porque es un cambio DENTRO del capitalismo, *sin trascenderlo*. Pero nosotros pretendemos todo lo contrario.

2. ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DE LA SOCIEDAD FUTURA

Habíamos dicho que la negación de una proposición, por postulado del tercero excluido, no es prueba de unicidad de la solución: las alternativas pueden ser varias. Así pues, negar al capitalismo no da automáticamente la sociedad del futuro, por la cual luchar. Pero no es menos cierto que, al menos, así se determina lo que *no* se quiere, y esto ya es parte de la solución. Saberlo conscientemente es tener aun una parte mayor.

En ese orden de ideas, para nosotros, la lucha *desde hoy* es por una sociedad en donde:

1. NO exista la propiedad privada de los medios de producción, circulación y distribución de “mercancías”: la misma palabra sale sobrando en este contexto.
2. No exista la división (actividad taylorista) capitalista que hoy se introduce en toda actividad humana, esto es, no debe separarse el trabajo manual del intelectual, no debe desconocerse el objetivo de toda actividad humana ni perderse el control sobre ella, no debe perderse la capacidad de iniciativa en toda actividad humana que se realice.
3. En la medida de lo anterior, no debe delegarse la iniciativa, control y definición de objetivos, políticamente, en una “minoría de especialistas”, por tanto, no debe separarse la “decisión política” de la necesidad, para *quién* decide, de implementarla práctica y concretamente: teoría y práctica no son separables a ningún nivel social.
4. A nivel ideológico, debe negarse toda concepción burguesa y en particular:
 - no deben olvidarse los *objetivos* de mejoramiento social de toda sociedad en aras del “eficientismo”;
 - no debe identificarse “progreso social” con la “capacidad de consumo” de todo tipo de mercancías;
 - no debe olvidarse que la cultura es un producto social de la historia, –una fuerza productiva–, lo que incluso “internamente” marca su contenido y formas, y, además, incluso en el llamado “nivel abstracto” de su contenido y metodología, no debe olvidarse que se debaten SIEMPRE, explícita o implícitamente, concepciones ideológicas, esto es, concepciones sociales de clase. En función de lo anterior, NO se debe identificar “avance científico y técnico” (diferenciación ideológica burguesa), en abstracto y al margen de la sociedad, como igual a “progreso”, “cultura en ampliación”, etc.

Se trata de cuatro características *necesarias* (no suficientes)

- negar *económicamente* al capitalismo (punto 1),
- negar *políticamente* al capitalismo (punto 2),
- negar la concepción capitalista de la *actividad humana*, la no separación de idea y acto (punto 3),
- negar la *civilización*, la *cultura burguesa* (punto 4).

Es claro, repetimos, que respecto a los cuatro renglones anteriores, sólo hemos expuesto un *conjunto mínimo* de características que NO debe poseer la sociedad futura: *No es utópico señalarlas en la medida en que son factores que hoy, concretamente, condicionan y sustentan la explotación social a todos los niveles.*

Al punto de vista político práctico, en lo que concierne a la *radicalización* de la lucha de clases, hay un *criterio adicional* que avala la necesidad de conocer ya explícitamente (al menos algunos rasgos generales) la sociedad futura por la que luchar: se es menos consistente en la lucha cuando se combate algo concreto desconociendo totalmente la alternativa buscada; la burguesía ha explotado *conscientemente* este hecho, presentando al capitalismo como “el menos malo” de los mundos concretamente realizados; la misma consistencia y aspereza de la burguesía en la lucha por sus intereses de clase ya *concretamente establecidos* prueba esta afirmación. Por otro lado, la alternativa concreta del “socialismo real”, por los defectos que ha acusado históricamente, ha dejado de serlo: típico de este fenómeno social es, por ejemplo, en Europa Occidental, la *desmovilización de amplios grupos sociales* de los grandes partidos de clase, antaño grupos militantes y combativos, a raíz de hechos tales como las *revelaciones* del XX Congreso del PCUS y las invasiones soviéticas de Hungría y Checoslovaquia. A la mística combativa por “un mundo mejor” ha sucedido el escepticismo.¹

Por tal motivo, uno más, no sólo es necesaria la crítica radical de todas las manifestaciones del capitalismo *no importa donde se presenten*, sino también formar una nueva conciencia social sobre lo que se persigue; por el papel concreto que ésta juega en la catalización de la lucha de clases.

Gramsci decía que, para juzgar del valor de un libro, había que conocer antes los actos de quien lo escribe; en forma análoga, pensamos que es irrelevante saber “intelectualmente” a dónde queremos ir, si no especificamos mínimamente el cómo se quiere lograr; al respecto tres criterios nos parecen esenciales:

1. Partir de la situación social históricamente concreta, SIN perder de vista el objetivo social perseguido a LARGO plazo: toda estrategia o táctica que oculte lo anterior refuerza el sistema imperante; al estilo del mayo francés, nos parece que la única forma de ser realistas, incluso para avanzar un sólo paso, es colocar la “utopía” como “programa mínimo”.

¹ En base al cual, por ejemplo, la ideología socialdemócrata demuestra “científicamente” la imposibilidad objetiva del camino revolucionario.

2. Lo anterior obliga a intentar instalar desde ahora, instancias organizativas, de discusión, decisión y ejecución, a todo nivel social, que ya configuren la sociedad del mañana, aun sí, en tanto exista el capitalismo, no logren ser ni definitivas ni estables; son necesarias por una doble razón: porque el ejemplo es más eficaz en la consolidación de una conciencia revolucionaria que mil análisis teóricos, y porque desde ahora hemos de aprender cómo resolver los problemas del mañana.
3. En última instancia, no creemos haya perdido validez alguna la necesidad de “practicar una línea política de masas” (son ellas las que hacen las revoluciones), que implica, clásicamente, informarlas, respetarlas, y confiar en ellas, pero para nosotros esto tiene el muy concreto significado hasta aquí expuesto:² no tenemos vocación populista o espontaneista, ni gusto por las frases hechas.

Resulta imposible plantearse tareas como las anteriores sin disponer de una concepción social a escala de TODA la naturaleza: no fuera más que porque, en todo lo anterior, hemos planteado mucho más preguntas que respuestas, y a todos los niveles.

Nuestra modesta contribución consiste, de ahora en adelante, en exponer algunos problemas (que todos deberíamos abordar) al respecto de lo anterior.

Hemos discutido lo que consideramos características globales importantes del capitalismo contemporáneo así como lo que creemos deberían ser rasgos fundamentales de una sociedad comunista.

Señalábamos que se necesita no sólo saber a dónde queremos ir sino que debemos especificar, aunque sea mínimamente, el conjunto de pasos y acciones que conducen a dicha meta y que para esto necesitábamos partir de la situación social históricamente concreta. En este sentido queremos señalar que el capitalismo no constituye un bloque homogéneo sino que, como hacíamos notar, existe una brecha entre los países capitalistas dominantes y los dominados; que la brecha entre ambos se abre con el transcurso del tiempo y que unos y otros son dos aspectos de la misma dinámica.

En el caso particular de los países de América Latina, aunque tienen elementos fundamentales en común difieren de modo importante en su situación económica y política. Desde el punto de vista económico, tenemos desde países muy atrasados como, por ejemplo, Haití, a países con un desarrollo económico bastante importante como es el caso de Argentina o bien los de Brasil y México. En lo político, nos encontramos con dictaduras militares oligárquicas como las de algunos países de América Central, dictaduras militares tecnocrático-fascistas (aunque con diferencias importantes con el fascismo europeo) como las de algunos países del Cono Sur y países “parcialmente democráticos” como México y Venezuela. También nos

² Básicamente implica partir de las necesidades concretas e inmediatas de las masas, luchar con ellas impulsando sus iniciativas, pero orientando explícitamente toda lucha hacia los objetivos finales perseguidos; pensamos que es innecesario insistir más en esto, al menos al nivel de este trabajo, por ser una problemática que creemos ya está clara, al menos desde la época de Lenin y Gramsci.

encontramos con rompimientos revolucionarios como el de Nicaragua. Esto condiciona la actividad de los científicos de izquierda en los diferentes países y, mientras en una dictadura militar como la de Chile, el pensar en ciencia alternativa carece probablemente de sentido, ya que la labor de los científicos de izquierda aparte de sobrevivir, debe ser prioritariamente un trabajo de lucha política en sentido estricto, la situación es bastante diferente para un país como México e incluso para un país como Brasil en el momento actual.

Por otro lado, las diferencias entre la infraestructura cultural, científica y técnica entre los diferentes países ponen límites a la labor que se puede realizar en cada uno de ellos.

Otros elementos que hay que tener en cuenta es la profunda crisis en la que se encuentra el capitalismo a nivel mundial (lo que agudiza algunas de las contradicciones intracapitalistas) y el hecho de que en los últimos años ha perdido terreno en puntos importantes de Asia (Indochina y más recientemente en Irán), África (Angola, Mozambique, Etiopía) y América Latina (Nicaragua). En este retroceso del capitalismo, ha desempeñado un papel importante la existencia de los países del "bloque socialista" cuya fuerza económica y militar ha restringido la libertad de maniobra de los países capitalistas dominantes y cuya solidaridad con las fuerzas populares ha permitido el triunfo de estas fuerzas en más de una ocasión.

Sin embargo, cabe señalar que los países socialistas de Europa Oriental, a pesar de sus avances indudables, presentan un conjunto de rasgos que hacen que, en nuestra opinión, no sean un modelo a seguir. No están en tela de juicio sus indudables conquistas socialistas; en la República Democrática Alemana, por ejemplo, en 1973, la enseñanza es gratuita a todos los niveles, 80 % de los estudiantes tienen becas para mantenerse, un éxito literario lo constituye una tirada de un millón de ejemplares, casas cuna y jardines de la infancia atienden gratuitamente al 73 % de los niños entre los tres y los seis años, y así sucesivamente. En la URSS, en el momento actual, hay 10 millones de personas con diplomas de enseñanza superior o de enseñanza técnica superior. Más aún: formalmente se ha abolido la propiedad privada de los medios de producción, resorte básico del capitalismo: jurídicamente no existe.

Pero otros hechos sociales también están presentes: la estratificación y jerarquización de dichas sociedades, con una burocracia todopoderosa en la cúspide, la constante violación de la "legalidad socialista", la existencia de "mercados paralelos", la filosofía consumista y despolitización de grandes sectores sociales (quizás el fenómeno social más grave); en última instancia, incluso hasta la taylorización de toda actividad humana a todos los niveles socialistas (sin los resultados eficientistas capitalistas por no ser, en última instancia sociedades capitalistas a parte entera): el "stajanovismo" o trabajo a destajo, el proceso de trabajo industrial "al estilo Fiat" en una ciudad como Togliatigrado, la estratificación jerárquica magisterial en el buen estilo de una Universidad Lomonosov (que en este aspecto nada deja que envidiar a sus homólogos occidentales), la rígida división jerárquica de funciones de decisión-ejecución en el aparato político, y así sucesivamente.

En el caso de China, aunque la revolución cultural hizo pensar en una organización política y económica, de la ciencia y de la técnica en que el control popular y la eliminación de las diferencias entre concepción y ejecución fuesen metas fundamentales, en los últimos años ha tenido lugar una gran retirada de estas posiciones (al menos a nivel de grupos gubernamentales) y, por otro lado, la política exterior china deja muchísimo que desear. Vemos pues que, al menos por ahora, China tampoco constituye un modelo que se pueda seguir acríticamente.

La sociedad capitalista actual se caracteriza por una articulación cada vez mayor y por la interrelación creciente entre los diversos aspectos de la actividad social y de la naturaleza. (La interrelación entre la ciencia, la técnica y la producción industrial que lleva el nombre de revolución científico-técnica, la problemática energética y ecológica a nivel planetario, el cientismo como ideología, etc.) Por otra parte, una sociedad comunista futura, en que partiendo del momento actual se intente disminuir sistemáticamente las diferencias entre concepción y ejecución, se caracterizará también por una interrelación grande entre los diferentes aspectos de la actividad social y el estudio de los sistemas complejos, con estas características, serán de interés primordial. Discutiremos este punto posteriormente, y a continuación comentaremos ciertas diferencias que surgen de la comparación de algunos rasgos globales del capitalismo contemporáneo con lo que señalábamos que, en nuestra opinión, eran aspectos fundamentales de una sociedad futura sin clases. A la luz de esta comparación comentaremos algunas de las características de las llamadas tecnologías alternativas y otras acciones coherentes con el tránsito a una sociedad comunista.

El capitalismo, en virtud de su necesidad de un “desarrollo” siempre creciente y de la producción por la producción misma, buscando la eficiencia productiva y tomando en cuenta sólo un número reducido de factores implica un desperdicio siempre creciente de recursos y la destrucción del medio ambiente “natural” y “social”. Sin olvidar que la sociedad humana por el hecho de estar en interacción con el resto de la naturaleza la modifica y es modificada por ésta, en una sociedad futura se buscará minimizar el “impacto destructivo” sobre la naturaleza, considerando, hasta donde se pueda, la situación en toda su complejidad y teniendo en mente la repercusión sobre las condiciones de vida de las generaciones futuras.

Frente a la centralización de las decisiones que caracteriza al capitalismo, se potenciará la descentralización y el control popular.

En vez del taylorismo, en que en virtud de la “eficiencia productiva” y de la confiabilidad global se impone la atomización del proceso de trabajo, como condición de una confiabilidad local que garantice un camino óptimo y una eficiencia productiva máxima, se buscará una organización del proceso de trabajo en que aún manteniendo la necesidad de la confiabilidad global no se pague el precio social que parece estar correlacionado con la confiabilidad local. A diferencia de las concepciones tayloristas en las que domina la idea de un sólo camino óptimo a nivel local, nos encontraríamos localmente frente a un gran número de caminos cuasiequivalentes consistentes con dicha confiabilidad global.

Sobre tecnologías alternativas (¿adecuadas?)

Bajo este nombre agrupamos un conjunto heterogéneo de proposiciones que tendrán como denominador común el desviarse del estereotipo del desarrollo científico-técnico de los países capitalistas avanzados. Algunas de ellas han sido presentadas por el capitalismo como posibles alternativas en vista de la imposibilidad de que los países de capitalismo dependiente sigan el camino de los avanzados y de los aspectos destructivos de la revolución científico-técnica en estos últimos, otros por personas de matices políticos diversos asociados a los movimientos ecologistas y otros por la izquierda marxista.

De estos aspectos mencionaremos:

a) *Tecnologías intensivas en trabajo y de bajo costo.* En los países capitalistas subdesarrollados "o de desarrollo intermedio" abundaría la mano de obra y faltaría el capital y se necesitarían tecnologías consistentes con estos rasgos. Nótese que por un lado esto permitiría (quizás) al capitalismo disminuir las tensiones anticapitalistas y por otro lado serían coherentes con una sociedad diferente de la sociedad industrial, centralizada, capitalista; es utópico el pensar en medidas técnicas aisladas que sólo sean coherentes con una sociedad capitalista o socialista.

b) *A pequeña escala.* Tendrían mayor capacidad de mano de obra que las grandes, podrían aprovechar recursos reales y otros factores de la producción que no existen en abundancia a escala local, presentarían mayor adaptabilidad y flexibilidad ante condiciones que cambian de modo rápido y facilitarían el control popular de las iniciativas y puesta en práctica de éstas.

c) *Tecnologías "blandas", "limpias", "ambientalmente sanas".* Tecnologías flexibles, durables y no contaminantes. En el caso energético se apoyan en flujos renovables de energía como el sol, el viento, la vegetación; son diferentes entre sí y cada uno de los componentes es capaz de aportar un máximo de eficacia en circunstancias definidas. Son flexibles y dan contenido técnico relativamente modesto (lo que es diferente a no sofisticado) y pueden ser entendidas y usadas sin capacidades particulares, facilitando así las iniciativas y control populares. Corresponden en escala y distribución a las necesidades de los consumidores finales.

Estas tecnologías blandas son coherentes con el aspecto anteriormente mencionado y a diferencia de las tecnologías duras, de alto contenido tecnológico y en general centralizadas y a escala grande, permiten la descentralización y minimizan el impacto sobre la naturaleza y la ecología.

d) *Tecnologías alternativas.* El término "alternativas" enfatizaría que no existe un camino científico-técnico único y que dada una formación social se tendrían tecnologías coherentes o no con ella. Las tecnologías dominantes en una formación social serán aquellas coherentes con los intereses de las clases o grupos dominantes y en el tránsito a una formación social diferente se necesitaría ciencia y tecnología alternativas.

Muchas de estas medidas serían coherentes con el tránsito a una sociedad comunista, facilitarían las iniciativas, comprensión y control popular de los procesos y permitirían disminuir las diferencias entre concepción y ejecución. Sin embargo, algunos de los aspectos serían consistentes con una organización alternativa

del capitalismo en que se eviten algunos de los problemas asociados al desarrollo “destrutivo” de las fuerzas productivas (aunque no es nada claro que el capitalismo pueda poner en práctica estos “aspectos alternativos” dados los intereses creados y las contradicciones internas presentes).

Hay que tener en cuenta que no se puede encontrar una tecnología o abanico restringido de tecnologías que sean *sólo* coherentes con un tipo de formación social dada y no con otras (aunque el grado de coherencia varíe según la formación social de que se trate). Será la claridad respecto a las características fundamentales de una sociedad comunista lo que permitirá absorber o rechazar, total o parcialmente, las diferentes tecnologías, así como desarrollar otras coherentes con el tránsito a dicha sociedad. Como se mencionaba al principio de este trabajo el cambio a una sociedad sin clases sería un cambio global en que no bastaría actuar sobre un número reducido de factores, sino sobre un gran número de ellos y es fundamental tener claros los rasgos del proyecto de sociedad a donde se quiere ir.

No habrá que olvidar la situación actual históricamente concreta y que las estructuras centralizadas y a gran escala (por ejemplo la Ciudad de México) tienen una gran inercia y no van a desaparecer de la noche a la mañana. Esta “inercia” debe ser tomada en cuenta en la táctica a seguir, sin dejar de oponerse a los pasos que conduzcan a la creación de nuevas unidades centralizadas de este tipo. Es posible que una sociedad comunista sea compatible con unidades de tamaño y “dureza” diversas siempre y cuando se ponga énfasis en el control popular y se intercambien los roles con suficiente velocidad. Las jerarquías seguirán existiendo, pero en vez de ser cuasiestáticas como en la sociedad capitalista, serían *jerarquías dinámicas* en las que se estaría un tiempo relativamente corto en las diversas labores; sin embargo, no cualquier proceso productivo sería compatible con estas *jerarquías dinámicas* y muchos de ellos tendrían que ser eliminados o reestructurados a fondo.

Por otra parte, si se tiene en mente no un “camino óptimo único” sino un conjunto de caminos cuasiequivalentes se podrían encontrar soluciones compatibles con restricciones o condiciones adversas.

Algunos aspectos de la dinámica de la evolución biológica parecen tener estas características y quizás el estudio de los fenómenos biológicos puede servir de fuente de analogías potencialmente útiles.

Un punto importante que hay que tener en cuenta es que en el tránsito a una sociedad sin clases juega un papel fundamental no sólo la ciencia y la técnica (y en general el desarrollo de las fuerzas productivas) sino la solidaridad humana entre grupos sociales coherentes, siendo una pregunta abierta cuál es el valor del umbral en el desarrollo de las fuerzas productivas que permita el cambio a una sociedad comunista. (Aunque el concepto de umbral en el desarrollo de las fuerzas productivas no es claro ya que dicho desarrollo no es una variable unidimensional acumulativa).

En las luchas revolucionarias de los pueblos chino y vietnamita ha jugado un papel fundamental la solidaridad entre grupos sociales coherentes (en parte asociado a las estructuras comunitarias del modo de producción asiático) y a pesar de las contradicciones y dificultades actuales en esos países, son ejemplos claros de la

importancia de la solidaridad humana y la conciencia de clase en la lucha por una sociedad comunista.

La discusión de los párrafos anteriores sugiere algunas líneas de investigación y enseñanza en los institutos y facultades de ciencias naturales. Un tópico general sería el estudio del flujo de energía, materiales e información (tanto en la sociedad humana como en el ecosistema del cual forman parte) coherente con los objetivos de las diferentes formaciones sociales. Se llevaría a cabo un análisis crítico de las características destructivas de ese flujo en la formación social capitalista y se trataría de aclarar las características que serían importantes en una sociedad comunista y, lo que es más importante, con los pasos concretos que puedan darse en el momento actual que sean coherentes con el tránsito a dicha sociedad futura. Dentro del margen de maniobra que se tenga deberá lucharse por ir poniendo en práctica los resultados de dicho análisis y se tratará de difundir en la sociedad, del modo más amplio posible, los elementos de juicio que permiten llegar a tales conclusiones operativas.

Los planes de estudios de las carreras deberían dar los elementos de juicio para poder comprender críticamente las características de nuestra sociedad, así como la interrelación entre los diversos aspectos de la actividad social que llamamos trabajo científico y el resto de la actividad social. El contenido, metodología y organización académica deberá, hasta donde sea posible, seguir los lineamientos de una organización no taylorista del trabajo científico.

Sobre el problema del tránsito a la sociedad futura

Dado el grado de articulación grande de la sociedad actual y teniendo en cuenta que se trata de algo tan nuevo y radical como es el paso a una sociedad sin clases, los cambios en uno o pocos de los factores, en general, serán reabsorbidos por la sociedad capitalista, o en el mejor de los casos, conducirán a sociedades que aunque con rasgos socialistas dejen bastante que desear en más de un aspecto y de las que no se vea claramente su evolución posterior hacia una sociedad comunista. Se necesitaría el cambio en muchos aspectos, el problema es muy complicado y la importancia de un análisis teórico profundo es obvia. Dada la complejidad de este trabajo teórico, debe ser objeto de un esfuerzo coordinado a nivel mundial utilizando los espacios que las contradicciones capitalistas dejen abiertos y ampliándolos mediante luchas concretas, constantes y coherentes.

Debemos tener en cuenta que en tránsito a una sociedad sin clases nos enfrentamos no a una revolución más sino a una "super-revolución", ya que, al menos teniendo en mente a Europa, significaría cuestionar lo sucedido desde los griegos hasta el momento presente. La concepción de la naturaleza, los rasgos dinámicos de la materia coherentes con la problemática de una sociedad radicalmente diversa, probablemente impliquen una concepción del mundo muy diferente a la que domina actualmente, incluyendo lo que llamamos ciencia y técnica. Los cambios en estas últimas pudiesen ser tan radicales que podrían ser algo cualitativamente nuevo respecto a lo que entendemos en el momento actual.

Aunque dicha concepción del mundo se irá plasmando en la lucha por una sociedad sin clases, en las páginas siguientes comentaremos algunos puntos que, en nuestra opinión, son pertinentes para dicha labor.

1] Necesitamos comprender los diferentes aspectos de la dinámica en la sociedad actual, incluyendo en esto las diferentes concepciones del mundo que en ella se presentan y las evoluciones (o revoluciones) posibles de estos aspectos. Creemos que en general habrá más de un camino a seguir y que la comprensión de dicha dinámica nos ayudará en una práctica coherente con el tránsito a una sociedad comunista.

Necesitamos analizar tanto los aspectos sincrónicos, es decir, la interrelación entre las diversas facetas de la actividad social en el momento actual, incluyendo las concepciones del mundo y la naturaleza, (y lo mismo para otras épocas históricas) como los aspectos diacrónicos, es decir, la evolución de estas facetas a lo largo del tiempo.

En el caso de las concepciones científicas deberíamos tomar en cuenta: *a)* el proyecto histórico (de reinterpretación de la evolución del pensamiento científico) que implican; *b)* la posición filosófica que sustentan; *c)* el proyecto pedagógico que implican; *d)* su contenido técnico: diferentes concepciones pueden utilizar las mismas *palabras* técnicas (y resolver los mismos, o casi los mismos problemas prácticos) con *contenidos* diferentes y dándoles una importancia diferente frente a otras; *e)* el método de razonamiento que emplean; *f)* su proyecto de investigación: las metas científicas que se fijan; *g)* con qué concepciones sociales son “coherentes”, ya que toda “concepción científica en sí” se integra perfectamente dentro de cierta concepción social, que defiende ciertos intereses *sociales* explícita o implícitamente; *h)* caracterizar la forma de la actividad social en cada época, en particular, el “modo de producir la ciencia” y correlacionarla con las diferentes concepciones científicas.

Estudiaríamos las correlaciones entre el cambio, a lo largo del proceso histórico, de las estructuras económicas, de la organización del trabajo industrial y científico, de las concepciones de las diversas disciplinas científicas, del arte, la literatura, etc.; primero en lo referente a los rasgos generales y luego en “zonas concretas y relativamente pequeñas” en detalle. Este trabajo tendrá como objeto el entender en “suficiente detalle” la dinámica compleja de los diversos aspectos de la visión del mundo y la naturaleza y de la actividad del hombre socialmente organizado, ayudándonos a comprender el momento actual, y lo que es más importante, sirviendo de herramienta para transformar nuestro mundo de modo coherente con el tránsito a una sociedad comunista.

Cabe señalar que creemos que es una labor difícil, que hay que evitar caer en conclusiones demasiado simplistas, pero que esta labor de investigación es una herramienta importante para la transformación del mundo actual. Aunque un programa de este tipo va mucho más allá de la labor que puede desarrollarse en una facultad de ciencias, el trabajo que se puede llevar a cabo en éstas es importante, ya que se debería sugerir cuáles son los aspectos de la concepción de la naturaleza que son coherentes con el tránsito a la sociedad futura y en los cuales debería centrarse el esfuerzo de la investigación en las ciencias naturales. Hay que tener en cuenta

que se trata no sólo de la temática sino también de la metodología y organización de dicho trabajo.

2] En el programa de trabajo que esbozamos en el párrafo anterior se estudiaría la concepción del mundo y la mediación con la naturaleza del hombre socialmente organizado. A ese respecto quisiéramos presentar algunos comentarios sobre dicha mediación en los que se plantean algunos de los rasgos de nuestra posición:

Un análisis de las concepciones del mundo a lo largo de la historia nos muestra la inagotabilidad de la naturaleza y que el cambio de nuestra concepción de ésta, lejos de tener lugar de un modo acumulativo, liso, meramente cuantitativo, presenta discontinuidades, cambios cualitativos en que los conceptos cambian radicalmente. Estos cambios revolucionarios separan épocas en que los cambios son más regulares y los aspectos de las diversas concepciones más comparables entre sí. Sin embargo, un análisis más detallado de estas épocas más tranquilas muestra la presencia de brincos de menor magnitud.

En una época y formación social dadas se reforzarían aquellos rasgos de la naturaleza que sean coherentes con la realización del proyecto social de las clases o grupos dominantes y que se integren con otros aspectos que ayuden a la realización de dicho proyecto. En general, la concepción del mundo no es única, ya que por un lado, en algunos casos se podrían tener, al menos en pequeña escala, concepciones paralelas congruentes con el proyecto dominante y, por otro, se tendrían concepciones que podríamos llamar "dominadas" por ser consideradas heréticas y en muchos casos coherentes con la realización del proyecto social de grupos o clases dominados. Como señalaba Gramsci, asociadas a una clase tenemos diversas elaboraciones de la concepción del mundo (folklore, ciencia natural, filosofía, etc.) que pueden ser parcialmente contradictorias y que muestran la huella del proceso histórico de su formación.

Al tener lugar una revolución social importante, cambiaría el proyecto social dominante y con ella cambiaría en rasgos fundamentales la concepción del mundo, la legalidad de la naturaleza, lo que se considera válido en nuestra medición con ésta.

En la época de transición revolucionaria, en que tiene lugar una lucha entre diferentes concepciones, no se tendría una sola concepción dominante y, más aún, aflorarían planteamientos del pasado que se creían superados y otros que, aunque amortiguados en la época post-revolucionaria, podrían aparecer en crisis posteriores.

Cabe señalar que T. S. Kuhn, en su libro *La estructura de las revoluciones científicas*, presenta una descripción fenomenológica de lo que él llama la secuencia: ciencia normal → ciencia revolucionaria → ciencia normal en que antes y después del periodo de transición (ya que ésta tiene una duración finita) se tendrían concepciones científicas dominantes diferentes, pero en dicho periodo de transición competirían concepciones diferentes con importancia similar. Kuhn comenta que durante esta transición la comunidad científica cambia de criterios de validez, de paradigma (o una nueva comunidad reemplaza a la anterior). Sin embargo, Kuhn dice poco sobre ese "cambio de mentalidad" de la comunidad científica. Debemos señalar los

importantes trabajos de la escuela italiana que muestran que estos zig-zags, estos cambios de concepción, en general no dictados sólo por los hechos experimentales y por la dinámica interna de la ciencia, serían comprensibles, al menos en sus rasgos generales, en virtud de la coherencia con los intereses económicos de las clases o grupos dominantes, es decir, a la luz del materialismo histórico.

Por otro lado, como mencionábamos anteriormente, si analizamos en detalle lo que sucede entre “grandes revoluciones científicas”, nos encontramos con “pequeñas revoluciones” en que una vez más se presentan en la zona de transición planteamientos paralelos; sería factor de reforzamiento de uno de estos planteamientos la coherencia e integrabilidad con lo que domina entre otras zonas, en que ese momento el cambio es más lento.

El hecho de que las diversas facetas de una “zona” de la concepción del mundo puedan presentarse transiciones revolucionarias en tiempos diferentes, lo que podríamos llamar “desarrollo desigual y combinado”, implica que en dichas transiciones permanecerían aspectos que cambian poco, los cuales servirían de puente a lo largo de la transición, pudiendo servir de base a una comparación que nos permitiría hablar de una articulación cada vez mayor y de un “progreso”.

¿Qué legalidad de la naturaleza es coherente con una sociedad comunista y lo que es más importante con su tránsito a ella? Como parte de esa pregunta, ¿cuáles serían los contenidos, metodología y organización del trabajo científico?

Como señalábamos anteriormente, la sociedad capitalista actual se caracteriza por una articulación cada vez mayor y por la interrelación creciente entre los diversos aspectos de la actividad social y de la naturaleza. En nuestra opinión, en una sociedad comunista, en una sociedad en la que se minimicen las diferencias entre concepción y ejecución y en que se giran los roles, dicha interrelación sería tanto o más importante. Consistente con esto, la problemática de los sistemas complejos abiertos en que hay que tomar en cuenta muchos factores y en que los subsistemas están acoplados entre sí y con el “exterior” de modo fuerte es y ha de ser cada vez más importante. En el método científico post-galileano (y en particular en la física) se buscan los factores importantes (esperando que sean pocos), se dejan de lado los demás como colaterales, cuya influencia se espera sea más pequeña y quizás no contribuyan de modo sistemático, y en virtud de esto se llevan a cabo experimentos en los que se cambian los factores principales. Al presentarse con frecuencia cada vez mayor problemas asociados a sistemas complejos abiertos en acoplamiento fuerte, problemas que por su importancia en la vida diaria no pueden dejarse de lado como “no maduro” nuestra concepción de la física, en particular, y de lo que entendamos por “método científico en sentido estricto”, podría cambiar de modo radical y transformarse en algo cualitativamente diferente.

A lo largo de esta dirección se podría, quizás, situar el énfasis cada vez mayor en la matemática no lineal, los fenómenos de bifurcación y los sistemas dinámicos caóticos y las características cada vez más complejas del espacio, del “vacío” en la física del micromundo. Aunque la concepción del mundo asociado a estos aspectos pudiera ser coherente no sólo con el tránsito a una sociedad comunista, sino también con la evolución del capitalismo en ausencia de la lucha consciente y

organizada de la clase trabajadora (lo que podría implicar una sociedad diferente a una comunista) creemos que debe potenciarse el estudio de estos sistemas complejos abiertos en los que se pone énfasis en el cambio y en la interacción y que se presentan en la problemática física, biológica y social. Cabe señalar que en la dinámica de estos sistemas complejos abiertos se presentan, entre otros aspectos, la coordinación de subsistemas para dar fenómenos de coherencia, los cambios de fase y fenómenos críticos y las descripciones parcialmente contradictorias. Vale la pena hacer notar que la descripción fenomenológica de Kuhn de las revoluciones científicas sugiere la dinámica de cambios de fase a través de la amplificación de fluctuaciones.

Los aspectos anteriores realizarían algunas de las llamadas leyes del materialismo dialéctico y es en este sentido que afirmamos que estas “características dialécticas de la materia” constituyen rasgos fundamentales de la legalidad de la naturaleza coherentes con el tránsito a una sociedad sin clases y quisiéramos denominar a la “super-revolución” que conduce a ella con el nombre de “revolución dialéctica”.

Sin embargo, como mencionábamos anteriormente, estos aspectos podrían quizás ser parcialmente coherentes no sólo con el tránsito a una sociedad sin clases sino una sociedad jerárquica a la cual evolucionase la sociedad capitalista presente en la ausencia de la lucha organizada por una sociedad comunista. En ese sentido, uno de los rasgos que habría que tener siempre en mente es la importancia del control popular y de la disminución sistemática de las diferencias entre concepción y ejecución. Cabe recordar que una de las características de la organización del trabajo (tanto industrial como científico) en la formación social capitalista es la atomización de éste en procesos elementales que deben ser altamente confiables (confiabilidad local) y que se montan en un diseño “óptimo” que se supone único o casi único.

Esta confiabilidad local sería garantía de la confiabilidad global. Lo anterior es válido tanto para el obrero en la cadena de montaje de una fábrica de automóviles como para el científico superespecializado en un gran instituto o laboratorio. En este último caso, los largos años de entrenamiento serían garantía de una confiabilidad local alta, diciéndolo de modo burdo, para que su respuesta teórica o experimental sea válida hasta un número grande de decimales. Cabe señalar que el concepto de un camino óptimo único asociado a un principio variacional de mínimo costo es uno de los conceptos básicos de la física tradicional.

En una sociedad en la que se enfatizen las iniciativas y el control populares y se minimicen las diferencias entre concepción y ejecución, se debería tratar de mantener la confiabilidad global, aunque correspondiendo a objetivos sociales comunitarios diferentes del de la ganancia capitalista, sin tener que pagar el precio social que parece estar correlacionado con la confiabilidad local. A diferencia de las concepciones “atomistas” en las que domina la idea de un sólo camino óptimo a nivel local, se sugiere que nos encontraríamos localmente frente a un gran conjunto de caminos cuasiequivalentes consistentes con una confiabilidad global. Por otra parte, la presencia de estas redes de caminos cuasiequivalentes tendrían una flexibilidad y una capacidad de adaptación grandes y permitirían un aprendizaje

rápido y eficaz. (Nótese que nos encontramos frente a las características fundamentales de las llamadas “tecnologías alternativas”, pero que estas características se extenderían a toda la organización del trabajo y al proceso de aprendizaje).

Vale la pena señalar que mientras en las computadoras digitales usuales la confiabilidad local de los componentes (que no falle ningún transistor, resistencia, etc.) es garantía de la confiabilidad global de los resultados de la computadora, el cerebro humano, aunque las neuronas “fallen” localmente, es en la mayoría de los aspectos mucho más poderoso que una computadora. Comentarios similares son válidos para rasgos importantes de la evolución biológica.

Se sugiere pues que el estudio de los fenómenos biológicos, teniendo en mente una concepción diferente de la “atomista y de cambio único”, puede dar pistas importantes para una organización alternativa del proceso de trabajo y posiblemente pueda servir de guía para cambios radicales en nuestra concepción del mundo inanimado.

La investigación de las “redes flexibles” mencionadas sugiere programas interdisciplinarios en los que se relacionan la física, la evolución biológica y la biología del sistema nervioso, la cibernética, la teoría de la computación y de la complejidad y la probabilidad. Posiblemente se necesiten nuevas matemáticas capaces de “lidiar” con los “haces de caminos cuasiequivalentes” de párrafos anteriores.

3] Aunque la discusión anterior plantea zonas de investigación y docencia alternativas, no debe olvidarse que esto es sólo parte de la lucha por un proyecto de sociedad diferente, que no puede ser separada de la labor política y que los resultados teóricos deben ser sólo un marco inicial que se modificará en experiencias comunitarias concretas.

En páginas anteriores mencionábamos que nos encontramos frente a una sociedad heterogénea a escala mundial, no habiendo desaparecido enteramente el capitalismo en ningún sitio.

Esto implica la necesidad de una lucha consciente, organizada y policéntrica a nivel mundial por el tránsito a una sociedad comunista. Las modalidades concretas de esta lucha dependerán de las características de los diferentes países y formaciones sociales, pero no habría que olvidar que en ninguna parte del mundo se tendría la garantía de llegar a una sociedad sin clases en la ausencia de la lucha popular consciente y organizada.

En ese sentido merecen especial mención experiencias obreras comunitarias como las de las 150 horas y las de la práctica científica de los consejos de fábrica en Italia. Aunque en el momento actual, debido a la problemática política global de este país, tenga lugar un reflejo de estas experiencias, en nuestra opinión, muestran un importante camino a seguir.

En el caso de países como México, asociadas a las contradicciones internas y al crecimiento relativamente rápido y desigual, nos encontramos con áreas en que existe un margen de maniobra bastante amplio. En particular, en las universidades ha aumentado notablemente el número de estudiantes y con ello el personal académico y aunque se presenta la estructuración jerárquica de otros países capitalistas, ésta no ha adquirido aún la rigidez de los países de Europa Occidental,

permitiendo la puesta en práctica de experimentos de enseñanza e investigación alternativas. Otro elemento adicional es que al ser menor la presión competitiva para publicar artículos científicos sobre temas de moda, existe potencialmente la posibilidad de llevar a cabo investigaciones alternativas coherentes con el tránsito a una sociedad sin clases.

El desarrollo desigual y contradictorio de las “áreas productivas” y la presencia de formas de producción precapitalista sugiere la potencialidad de llevar a cabo una labor de organización alternativa en esas áreas, aunque hay que tener en cuenta que el nivel de represión potencial y real es mayor que en las universidades y otras instituciones de enseñanza.

Las características anteriores permitirían la puesta en práctica de “dominios abiertos, activos” en que se tratase de resolver algunos de los problemas que se presentan en el tránsito a una sociedad comunista y permitiese acumular experiencia que ayudaría a minimizar los errores en países en que tras una rotura revolucionaria se presentan un conjunto de problemas que es necesario resolver con rapidez. El adjetivo de “abierto” enfatiza el hecho de que no se trata de dominios aislados de la práctica asociada a la problemática política y económica de la sociedad en que están inmersos, sino que implican una lucha constante, y con “activos” queremos señalar que sólo esta lucha constante logrará la persistencia de estos dominios, teniendo en cuenta que en más de una ocasión la presión represiva los hará desaparecer localmente aunque un esfuerzo organizado permitirá su aparición en otras zonas.

Dentro del marco de la docencia, y hasta donde lo permita el margen de maniobra que se tenga, deben ponerse en práctica planes de estudios que permitan conocer la realidad social del capitalismo, el carácter histórico de la ciencia, la participación en experiencias comunitarias y la solidaridad activa con aquellos países en los que tenga lugar un rompimiento revolucionario.

⊙ *Esta es una página en blanco.* ⊙

EL SIDA, AZOTE DEL TERCER MUNDO, O HACIA LA BÚSQUEDA DE NUEVAS TERAPIAS CONTRA EL SIDA *

EN el presente trabajo comentaremos sobre ciertos aspectos relativos a cómo los derechos humanos del paciente con SIDA (Síndrome de Inmunodeficiencia Humana) dependen tanto del tratamiento que éste tome, como de la visión que tengan de la enfermedad el paciente y las personas de la sociedad con los cuales está relacionado.

Si bien se ha conjeturado que los orígenes del SIDA se encuentran en algunos monos verdes africanos, los primeros reportes documentados se hallan entre individuos de altos recursos económicos de la comunidad homosexual de San Francisco, en 1981, por lo cual podría considerarse que dicha enfermedad era originariamente del primer mundo.

Sin embargo, actualmente la epidemia se ha propagado a todos los confines de la tierra y es en los países del tercer mundo donde se ha convertido en un verdadero azote, dadas las condiciones educativas, económicas y sociales prevaletentes en ellos. Una región notablemente dramática es el África subsahariana, donde una de cada 12 personas está infectada y de las cuales un poco más de la mitad son mujeres. La mayor parte de esas personas, unas 23 millones, morirán en los próximos años.

Por otro lado, de ser una enfermedad confinada a núcleos de hombres homosexuales, ahora se transmite, principalmente, en la población abierta heterosexual, ya sea por la vía sexual, por inyecciones en el uso de drogas o por la transmisión de madres a hijos. Es notable el hecho de que entre las mujeres es donde más rápidamente ha aumentado la tasa de inserción; en México, esto se debe, en buena medida, a que un porcentaje considerable de hombres heterosexuales tienen contactos homosexuales ocasionales, infectando posteriormente a sus compañeras cotidianas.

Entonces, si bien en el tercer mundo existen enfermedades infecciosas, como el paludismo, que matan a un mayor número de personas que el SIDA, éste, hasta la fecha, es incurable, y se ha propagado muy rápidamente entre grandes núcleos de la población más pobre. Urge, por lo tanto, encontrar terapias efectivas y baratas que puedan ser aplicadas con facilidad en regiones apartadas que no cuenten con

* Ponencia impartida el 22 de junio del 2000 en la CNDH, Ciudad de México. Publicado en: CNDH, 2003. *Prevención de la violencia, atención a grupos vulnerables y los derechos humanos: Los derechos de los pacientes*, Fascículo 4, México.

los servicios médicos adecuados. Para que se encuentren estas terapias es necesario un cambio de la visión que se tiene del enfermo de SIDA: de ser un apestado a ser una persona y un portador crónico, como en los casos de amebas, de hepatitis o de alguna enfermedad similar. Con el fin de entender en qué consiste la búsqueda de estas terapias, señalaremos brevemente algunas características de la situación.

En un cuadro que muestra las estadísticas a finales del año pasado, aparecen como regiones el África subsahariana, el norte de África y Medio Oriente; el sur y sureste asiático, básicamente India, Camboya, Vietnam; este de Asia y Pacífico, que incluye a Chile y Japón; después Latinoamérica, desde el río Bravo hacia el sur, pero excluyendo el Caribe, es decir, Haití, Puerto Rico, Cuba y las pequeñas Antillas; luego Europa del este y Asia Central, o sea, el antiguo mundo socialista; Europa del oeste y Norteamérica, que en este caso sólo es Estados Unidos y Canadá, y luego Australia y Nueva Zelanda.

Lo primero que resalta es que de un estimado de 33.6 millones de personas (adultos y niños) que viven con el virus del SIDA, 23 están en África subsahariana o África negra. Después tenemos un número relativamente grande, seis millones, en el sur y sureste asiático, no obstante hay que tener en cuenta que en la India, por ejemplo, hay mil millones de habitantes, con lo que el porcentaje se reduce en proporción.

¿Qué cifras nos podrán dar una mejor idea de lo que está pasando? En África subsahariana, el 8% está infectado, quiere decir que una de cada 12 personas es portadora del virus, y hay zonas, como Uganda, Zimbabwe y la propia Sudáfrica, en que este porcentaje es mucho mayor.

En otros lados encontraremos cantidades intermedias: en el Caribe, 2%, uno por cada cincuenta; en México, Norteamérica y el sureste asiático, alrededor de medio punto por ciento (en México hay 0.69%, en Norteamérica 0.56%, en Latinoamérica, 0.7%). Europa del oeste cuenta con la mitad de ese porcentaje, un cuarto por ciento. Luego hay porcentajes menores en el norte de África; son muy pequeños en China y Japón, etcétera.

Hay una correlación, hasta donde yo sé, basada en suposiciones sobre el comportamiento personal, sobre la promiscuidad, pero que tal vez dan una idea falsa, entre el porcentaje de personas infectadas y el porcentaje de mujeres infectadas. Por ejemplo: en África, donde el 8% están infectados, más de la mitad son mujeres; en cambio, en China y en el Pacífico, el porcentaje es muy bajo, el 15%. En el Caribe hay 2%, y en la India y en Cambodia hay 30 y 20%, respectivamente. Entonces, puede verse que de ser una enfermedad de hombres homosexuales se está transformando en una enfermedad que pueden padecer tanto el hombre como la mujer, y que no es claro a qué se debe la correlación entre el porcentaje de personas infectadas en la sociedad y el porcentaje de mujeres.

Estos son algunos de los rasgos de la enfermedad. Inicialmente empieza como un padecimiento de tipo viral, a modo de la mononucleosis infecciosa, en el cual, durante un periodo de un mes, el paciente tiene fiebre, dolores musculares, inflamación de los ganglios y, de hecho, si se analiza su sangre se encontrará el virus en gran cantidad; una curva de virus en sangre mostraría un pico elevado durante

el primer mes; luego, durante años desaparecen los síntomas, hay pocos virus en sangre, y después de un periodo que en promedio depende también de la edad se desencadena la sintomatología: a los jóvenes les da el SIDA después de tres años; a las personas maduras después de diez, y a los viejos, después de siete. Estos números son aproximados.

La sintomatología del SIDA comprende síntomas de tipo general, como fiebre, diarrea, debilidad extrema, gran pérdida de peso, y, por otro lado, aparecen enfermedades oportunistas que normalmente causarían menos daños o no harían daño: el porcentaje de tuberculosis, por ejemplo, aumenta mucho, pues es una enfermedad oportunista; actualmente se sabe que hay macrófagos, es decir, células que están doblemente parasitadas por el bacilo de la tuberculosis y el virus del SIDA, y cuando éste se dispara, también lo hace aquél; aparecen formas desacostumbradas de neumonía, lo que llaman *neumosisi carine*; micosis de diversos tipos; enfermedades virales; tumores malignos, y también existe sintomatología en el sistema nervioso central, lo que se llama demencia del SIDA.

Una curva indicaría que al principio habría pocos virus en sangre, los cuales luego aumentarían, pues esto era todo lo que se veía en los análisis de sangre. Sin embargo, hace cuatro o cinco años se observó lo que ocurre mientras tanto en los ganglios linfáticos, y se encontró que mientras en sangre hay poco virus, en los ganglios linfáticos hay muchos y se están reproduciendo rápidamente. Este hecho implicó un cambio, que tal vez podría ser psicológico, entre los enfermos y el público en general hacia la enfermedad, porque se perdió la sensación de esperanza que habían mantenido durante este periodo las personas con pocos virus y que estaban resistiendo, confiadas en que su sistema inmunológico estaba peleando y eventualmente podría acabar con estos virus "guerrilleros". Mas cuando se descubrió que realmente en el sistema linfático existe mucha actividad viral, ocurrieron serios trastornos; por ejemplo: en Inglaterra hubo grandes movimientos sociales en los que, entre otras cosas, los manifestantes acusaban a los médicos, a la comunidad médica y a las compañías farmacológicas de haberlos engañado por haberles asegurado primero que estaban casi sanos y luego decirles que estaban mal. Esto muestra que, en parte, la reacción del paciente y de la sociedad dependen de la visión que uno y otra tengan de la enfermedad, ya que en el momento que se encontró alta actividad en ganglios linfáticos hubo un cambio.

A continuación comentaré un poco acerca del ciclo del virus, porque dependiendo de esto podré referirme a cuáles son los enfoques terapéuticos, en qué sentido han funcionado o fallado, cómo se podrían mejorar y cómo, al cambiar la visión de la enfermedad, se podría esperar que el enfermo del SIDA deje de ser un apestado para convertirse en un portador de enfermedad digno de respeto.

¿Qué es el virus? El virus del SIDA es uno de los virus más complicados que hay. Tiene una parte interna y una externa. La parte interna es una cápsula de proteínas con la forma de un cono truncado, o de un piloncillo, al que quizá se parece más, y dentro tiene dos hebras de genes del virus, de ácido ribonucleico, con algunas otras proteínas que le van a servir para copiar, cuando entre en la célula, estos genes de ácido ribonucleico y ácido desoxirribonucleico, que es lo que forma los

cromosomas, e integrarse dentro de los genes de los cromosomas de las células infectadas. Además, por fuera de esto hay una segunda cápsula que tiene, por un lado, una cubierta de proteínas, y por otro, una membrana grasosa, lipóidica, que es del mismo tipo de membrana que tienen todas las células. En la superficie de esta membrana celular hay unos *chipotes*, unas proteínas envolventes que, por decir así, son como minas, que si se choca contra ellas explotan; aquí, estos *chipotes* son como los detonadores de estas minas, y cuando una de esas proteínas hace contacto con ciertos receptores que tiene la célula, los infecta, se pega; luego se fusionan las membranas del virus y de la célula, entra el *piloncillo*, se deshace, y la información genética de esta hebra se integra en el núcleo de la célula y permanece; puede estar ahí, en estado latente, hasta que la célula se reproduce, pero no sólo se reproduce a sí misma, sino también a los genes y a las proteínas del virus. Mientras que a este tipo de proteínas normalmente les gusta estar en las membranas grasas, una célula infectada las tiene en la periferia; esto quiere decir que cuando llega el virus estos *detonadores* ya están ahí presentes, y no necesita fabricarlos.

Tras el periodo de latencia, los ganglios linfáticos crecen, los centros germinales tienen patología y ciertas células que tienen los ganglios linfáticos y que son como arañas se cubren de virus al principio del periodo de latencia. Hiperplasia folicular es un concepto que alude al crecimiento, pero con el tiempo, a lo largo de los años, y cuando se acerca el desencadenamiento del virus, estos centros germinales, estas células propias de los ganglios degeneran, los virus las abandonan, y se pasa de tener un ganglio crecido a ganglios degenerados. En este momento se desencadena la enfermedad.

Por otro lado, conviene hacer algunos comentarios sobre la terapéutica. A lo largo de la historia, o al menos en los siglos XIX, XX y XXI, existen tres enfoques generales de tratamiento de una enfermedad. El primero es prevención y profilaxis. Vale la pena hacer notar que a finales del siglo XIX, cuando se puso énfasis en la higiene, bajó la mortalidad drásticamente. El otro enfoque, que también proviene de esa época, son las vacunas. Una vacuna, diríamos, es una infección artificial de bacterias atenuadas por una proteína de ellas mismas; el organismo crea anticuerpos contra ese tipo de proteínas, contra ese tipo de bacterias o de partes de las bacterias, y esos anticuerpos se mantienen circulando de manera que cuando una bacteria verdadera ataca, la destruyen. El otro enfoque terapéutico son las llamadas *balas mágicas*, esto es, encontrar un compuesto químico que mate a los virus, a las bacterias. Las *balas mágicas* más importantes del siglo pasado son, primero, las sulfas, y luego, los antibióticos, que eliminaron la mayor parte de las bacterias. Los virus son un poco más difíciles. Lo anterior quiere decir que para enfrentar el SIDA podemos recurrir a estos tres enfoques generales.

La profilaxis la podemos dividir en dos partes: una, la educación y otra, los procedimientos físicos. Como se trata de una enfermedad que se transmite por contacto sexual, los preservativos o condones pueden ser de gran ayuda. No obstante, para tomar medidas preventivas es necesaria la educación. En nuestras sociedades, un poco machistas, existen prejuicios con respecto a usar condón, por temor a que se interprete como falta de virilidad. Existen estudios sociológicos muy intere-

santes realizados en la comunidad chicana de Chicago, sobre cómo el padre lleva al niño a que se eduque en las casas de prostitución. Esto sugiere que se debe hacer énfasis en la educación en la profilaxis. En Latinoamérica, dicha profilaxis es más difícil de alcanzar que en las sociedades de Europa occidental, pero más fácil que en África.

El segundo enfoque han sido las vacunas. ¿Qué pasa con las vacunas? Existe información en el virus que se copia *al revés* para integrarse en los cromosomas, y luego, cuando la célula se divide, también fabrica virus. Lo que sucede es que esta copia *al revés* no es idéntica; en otras palabras, el virus es mutante, porque al copiarse al revés copia algo diferente y el virus resultante es diferente. Es un virus altamente ajustable, un poco similar al de la influenza, aunque por otras razones. Hasta el momento no se ha podido encontrar una vacuna que elimine al virus, en una gran parte porque es un virus altamente mutable. Pero en realidad hay otro elemento, quizá más importante, y es que, una vez que el virus se mete en los cromosomas de las células, éstas pueden estar ahí años sin dividirse, pero cuando lo hacen el virus está ahí. Mientras se encuentra en los cromosomas la única huella es que hay algunas de estas proteínas en la superficie, y las *balas mágicas* tienen poco que hacer.

Hasta el momento, ¿cuál ha sido el enfoque terapéutico? Uno de los enfoques terapéuticos es evitar la reproducción del virus. ¿Cómo? Dado que el virus, para reproducirse, se tiene que copiar a sí mismo, y a fin de hacerlo debe de reproducir una secuencia genética una, otra y otra vez, se introducen compuestos químicos parecidos a las llamadas bases púricas y pirimédicas, componentes del ADN, en los genes, para que la copia los acepte como buenos, y luego no funcionen. Entonces, estos componentes genéticos un poco cambiados harían que se pare la maquinaria del virus. Otra manera de evitar la reproducción del virus se basa en que cuando éste forma sus proteínas, inicialmente crea una muy larga que luego se parte en pedazos, gracias a unas encimas y unas proteasas que rompen esa superproteína; entonces, existen inhibidores de las proteasas que impiden que, aunque el virus esté en el citoplasma de la célula, la superproteína se rompa y éste se propague.

Pero, ¿cuál ha sido el éxito? Ya hablamos de la profilaxis: si cuenta con apoyo de la educación, es más efectiva, y si se subordina a la miseria, o a otras restricciones sociales, es menos. Hay que decir que las vacunas no han funcionado hasta ahora. Como hay mutación, durante un periodo los inhibidores funcionan, pero luego, a los dos, cuatro, seis meses, hay virus que escapan al medicamento. De aquí surgió la idea de administrar tres inhibidores simultáneos en lugar de solo uno, con el propósito de inhibir la producción de virus durante mucho tiempo sin que haya un escape mutacional. Y eso tiene el nombre de *cóctel*. Hay uno triple que es bastante efectivo y que ha bajado la mortalidad hasta alrededor de 40 %, incluso hasta 20 %, y ha alargado el periodo de infección sin que la gente fallezca en Europa Occidental y en Estados Unidos.

¿Cuáles son los inconvenientes? Uno de ellos es que, no obstante que sólo uno entre un millón de virus escapa, esto eventualmente ocurre. Otra dificultad es que, por alguna razón, hay virus que, a pesar de los tres cócteles, no parecen verse

afectados, pero son porcentajes bajos. Con esto, la mortandad ha bajado mucho y ha aumentado la confianza de la gente, sabiendo que el mal no es irremediable, y que el contagio sólo puede ocurrir por contacto sexual y transmisión por sangre, bien sea por jeringas infectadas o a través de la placenta, de madre a niño. Con esto, en Europa Occidental y Estados Unidos ha cambiado básicamente la visión hacia el sida: ya no es un apestado, sino un enfermo con el cual se puede convivir.

¿Cuáles son las dificultades de este cóctel? Uno, que es caro: cuesta aproximadamente mil dólares al mes, que para Estados Unidos resulta costoso, y más aún para América Latina; pero en África, un tratamiento que cueste mil dólares al mes está fuera de cualquier alcance. Pero este no es el único inconveniente. Otro es que se necesita tener una rutina muy precisa, por ejemplo hay que tomar las píldoras a horas muy determinadas, y si se pierde el ritmo el virus regresa. Esto quiere decir que en un continente como África, sin cultura médica, un tratamiento caro que tiene que seguir un ritmo muy preciso no funciona, porque probablemente sigan el tratamiento durante un mes hasta sentirse bien y luego desistan, con lo que todo resulta infructuoso.

A continuación me referiré a un enfoque del problema generado por un grupo que tenemos en el Instituto de Física, en la Facultad de Ciencias y en el Instituto de Investigaciones Biomédicas. El planteamiento es que, con algo de optimismo, en dos a cinco años se habrá encontrado un modo para prolongar el periodo del SIDA o, incluso, para servir como vacuna. Creemos que si durante el periodo de latencia sí hay virus en sangre, pero controlado, si se pudiera prolongar la latencia, en vez de dar el SIDA después de 10 años, daría después de 60, pues sería como ciertos gérmenes (el de la tuberculosis, el del herpes) que uno lleva sólo como portador. Entonces, si se pudiera alargar el periodo de latencia durante mucho más tiempo, habría una salida. Mas cabe preguntar, ¿por qué al principio, durante el primer mes, hay gran cantidad de virus y luego solamente pocos? Existe evidencia experimental de que cuando las células infectadas pasan por los ganglios, se inhibe su proliferación. Entonces, lo que al parecer ocurre, aunque esto es en el escenario más favorable, es una parálisis de células en los ganglios. De ser así, todo resulta más complicado. Cada célula infectada tendrá en la superficie la proteína del virus, esos *detonadores* que mencionábamos en la membrana grasosa, que cuando el virus sale se los lleva. Pero las células en general, y en particular las inmunológicas, tienen receptores, a los cuales se adhiere una sustancia determinada, que puede ser una proteína de una bacteria u otras cosas; esto la excita y la hace producir más células que eventualmente pueden eliminar las bacterias. Así, una célula no infectada tendría un receptor con la característica de que cuando algo se le pega se estimula, prolifera y produce sustancias químicas para el metabolismo o para el control de la enfermedad.

Pero, ¿cuál es el problema? Que si una célula infectada no es detectada por el organismo, cuando por alguna razón se estimula y divide empezará a cumplir su función de fraccionarse y secretar sustancias, pero también virus. Al parecer, por esto es que con mucha frecuencia en estas células junto a la proteína del virus hay receptores que en circunstancias especiales en los ganglios linfáticos producen an-

ticuerpos y monoglobulinas, o sea proteínas que tienen la capacidad de pegarse a la proteína del virus y a estos receptores; cuando esto sucede, paralizan a la célula infectada. Entonces, ¿qué pasa en este escenario? Se detiene la proliferación de estas células. Esta hipótesis parece ser cierta. En cuyo caso, ¿cuál sería el enfoque? Inyectar algo para hacer que algunas células produzcan anticuerpos o inmunoglobulina de ese tipo.

Esto también se sugiere respecto a otras enfermedades, en las cuales no se mata al virus, sino que se paralizan las células infectadas que lo contienen en estado latente, o bien las bacterias en estado latente, como sucede en la tuberculosis, para que no se reproduzcan.

Si relacionamos esto con el pico inicial de la enfermedad, en el cual se producen muchos virus hasta que este proceso se detiene, es posible pensar que en el momento de estarse creando los virus, este tipo de proteína, de inmunoglobulina, paralizaría en gran parte la proliferación de virus e, incluso, quizás abortaría la enfermedad como ante una vacuna preventiva. Al respecto, un grupo de científicos estamos intentando montar protocolos experimentales; aunque no tenemos noticias de que otros lo estén haciendo, es bastante probable que en otras partes se esté investigando todo esto.

Como es casi seguro que éste sea el escenario, la cuestión está en reproducirlo de modo artificial. De poder realizarse, ¿qué significaría? Por un lado, se alargaría el periodo de latencia, y por otro, quizá se haría abortar la enfermedad. Si esto ocurriera, podría haber una transición a nivel de derechos humanos, pues se podrá ver al enfermo como un portador de una enfermedad controlable, y no como si fuera un apestado; así, los derechos humanos del sidoso dejarán de ser violados. Mientras no haya un cambio en la estructura, la educación superestructural va a tener muchas limitaciones. Entonces, a nivel personal, y casi como vaticinio, pensamos que dentro de dos a cinco años será posible obtener un tratamiento barato para resolver, en parte, el problema, alargando el periodo de latencia y funcionando quizá como vacuna, la cual podría aplicarse en países de Latinoamérica, donde la situación es difícil, o en África negra, donde es casi imposible.

Para concluir, creemos que los derechos humanos de un paciente, y en particular del sidoso, dependen en gran medida de la visión de la enfermedad que tienen él y el resto de la sociedad. Al respecto, recordemos que cuando se descubrió que los virus se desarrollaban en los ganglios, hubo un cambio negativo, de hecho agresivo, y una reacción de frustración de los enfermos. Entonces, si se da un cambio estructural mediante una vacuna de algún tipo, va a modificarse drásticamente de manera positiva la noción del sidoso que tienen tanto él mismo como quienes lo ven, y se transformará el ámbito del respeto a sus derechos humanos. Empleando terminología marxista, lo anterior se expresaría afirmando que si no hay cambios en la estructura propiamente dicha, en la infraestructura, los cambios de educación superestructurales, aunque son necesarios, son difíciles. No obstante, por ejemplo, en Tailandia, que es un país no muy avanzado, se hizo una campaña de profilaxis y bajó drásticamente la enfermedad. El nivel económico de Tailandia no debe ser superior al de México, aunque allá existen el confucionismo y otros factores sociales

generales diferentes a los de aquí, pero el hecho es que si ellos lo lograron, nosotros podríamos hacerlo igualmente en nuestro país, siempre y cuando el mexicano tenga confianza en la sociedad médico-política, pues mientras desconfíe de ella los avances serán difíciles.

ENFERMEDADES COMPLEJAS, “UN PUENTE” ENTRE PARADIGMAS*

INTRODUCCIÓN

LOS problemas de salud que nos aquejan suceden en un mundo inmerso en “crisis globalizadas”, de las que no escapan las diversas disciplinas científicas. Estas crisis, que afectan no sólo la situación económica, política y social del mundo entero, tocan las diversas formas de pensamiento, de tal manera que nuevos paradigmas se abren paso a contracorriente, como sucede en las transiciones de cada época.

Los grandes problemas de finales del siglo XX nos confrontaron con las limitaciones que diversos enfoques disciplinarios de la ciencia clásica tienen para su resolución. En nuestros países las aberraciones del capitalismo subdesarrollado han marcado la impronta de las transiciones epidemiológicas. Se nos presentan las enfermedades más frecuentes del capitalismo desarrollado, sin haber solucionado los problemas propios, sobre todo secundarios a las infecciones controlables.

El análisis sereno de las situaciones que enfrentamos nos conduce a la exploración de nuevos caminos que, primero intuitiva y luego paulatinamente sistematizados, como es ahora el caso de la ciencia de la complejidad, que renueva y refuerza el actuar interdisciplinario, nos podrá dotar de herramientas capaces para enfrentar algunos de los retos del siglo XXI.

La medicina, como cualquier otra disciplina científica, pasa necesariamente ahora por una transición de fase y las enfermedades complejas son un magnífico ejemplo de ello.

En esta exposición hablaremos de su concepto, veremos que son un problema relevante de salud pública, revisaremos algunos de los elementos de su transmisión hereditaria, sus enfoques y niveles de estudio y los problemas en el abordaje; en forma breve brindamos como ejemplo la diabetes, su relación con la obesidad y el cáncer; planteamos cómo podremos abordar estos problemas con algunas herramientas de la ciencia de la complejidad, planteamos algunos parámetros de control que pueden, desde ahora, ser identificados y hablamos de la utilidad de las comunidades de práctica para ello y, por último, esperamos que pueda identificarse en el desarrollo del tema a las enfermedades complejas como puente entre paradig-

* Ensayo escrito por Moisés Villegas, Alberto Lifshitz y Germinal Cocho. Publicado en: Ruelas, E., y R. Mansilla (coords.), 2015. *Estado del arte de la medicina 2013-2014: Las ciencias de la complejidad y la innovación médica: aplicaciones*. México: Academia Nacional de Medicina de México / CONACYT.

mas, sin que nos propongamos estigmatizar o desconocer la utilidad y logros de cada uno de ellos.

CONCEPTO

Diversos autores han considerado las enfermedades complejas como padecimientos de variables múltiples, con un trasfondo genético poligénico y con una fuerte interacción con el ambiente (Craig, 2008). Como puede constatarse en este concepto ya la medicina transitó por el camino de la unicausalidad a la multicausalidad, pero si bien se reconoce la multiplicidad de variables y el papel de los factores ambientales, se ha seguido privilegiando la determinación genética, como lo muestra el enfoque derivado de la conocida era genómica.

Sin embargo, el reconocimiento de que no están determinadas por un solo gen o un sólo factor ambiental nos ha llevado a considerar la acción combinada de muchos genes, factores ambientales y conductas de riesgo. Sin duda, el problema actual es dilucidar la interacción de los múltiples componentes que participan en la génesis de estos padecimientos, es decir, cómo abordarlos sin reducir los componentes, ya que las propiedades que emergen de un sistema no pueden explicarse por las propiedades individuales de los elementos que los componen.

En el concepto actual de enfermedades complejas, la complejidad sólo lleva implícitamente la multiplicidad de variables, pero es más que eso. Si bien no existe una definición precisa, se puede plantear como concepto de sistema complejo lo siguiente en lo que en general hay acuerdo: son sistemas con muchos componentes (multiagentes) que interactúan entre sí dando lugar a la emergencia de una gran variedad de comportamientos globales interrelacionados, que no pueden ser explicados por la reducción de sus componentes, debido a la no linealidad de su dinámica. Pueden situarse en regímenes críticos caracterizados por fluctuaciones espaciales y temporales en todas las escalas posibles de manera espontánea, sin la intervención de factores o fuerzas externas al sistema, dicha propiedad es la de autoorganización.

La complejidad es pues, riqueza de comportamientos y gran cantidad de información, además es zona entre orden y desorden del régimen en que operan los sistemas. Los sistemas complejos están constituidos por elementos, dinámicas e interacciones heterogéneas. Debido a esta heterogeneidad y a las leyes de los grandes números, muestran, por un lado, aspectos genéricos (leyes de potencias, redes de mundo pequeño con atajos, etc.) y, por otro, exhiben características específicas, muestran comportamientos tozudamente individuales.

Se ha encontrado que los sistemas complejos robustos y adaptables están en la zona crítica, en que basta un cambio pequeño en la señal reguladora para generar un cambio grande, cuantitativo o cualitativo en el sistema; y también se tiene que las leyes genéricas que exhiben son válidas para sistemas de distinta naturaleza, ya sean sistemas físicos, biológicos o sociales.

Los organismos vivos en sus diferentes niveles están cerca del punto crítico. Siendo paradigmáticos para los sistemas complejos, es ahí donde se pueden ver

de forma ubicua aspectos genéricos/específicos muy importantes. Por una parte, los organismos vivos tienen una diversidad enorme; por otra, comparten aspectos generales como la llamada molécula de la vida, el DNA. En la búsqueda de mayor generalidad, en las discusiones de astrobiología se cita "una vida basada en carbono", y esto sería una forma muy específica. En el caso de los sistemas sociales vemos aspectos particulares en los individuos, esto es, "cada cabeza es un mundo", pero el comportamiento de un colectivo, por ejemplo en una manifestación de protesta, tiene generalidades que son hasta cierto punto predecibles. Lo mismo puede decirse de los hábitos de compra, transporte, alimentación o búsqueda de información en Internet como ejemplos, entre otros.

Exponer aquí la base epistémica que subyace y de la que se desprenden los cambios en las relaciones objeto-sujeto y en la metodología escapa al objetivo de este trabajo. Baste mencionar que el abordaje actual de un sistema fundamentalmente biológico nos obliga a escudriñarlo en sus diferentes escalas y cómo van emergiendo las propiedades del interaccionar colectivo de sus componentes, conocer su dinámica y ubicar sus parámetros de orden y de control para poder incidir en él.

La complejidad primero se nos presenta como problema y en su acepción de "complicado". La multiplicidad de variables y la multicausalidad de las enfermedades, en donde los mecanismos fisiopatogénicos no son claros, nos llevó a adoptar "lo complejo" casi como sinónimo de idiopático. Siguiendo el paradigma clásico, nos encontramos con la complejidad a nivel molecular y genético, en donde la comprensión de la interacción de los componentes requiere de un gran poder de cómputo.

La visión lineal en la clínica, donde una causa produce daño, mismo que se expresa en signos y síntomas y que nos indica el tratamiento, mostró su límite.

La complejidad nos confrontó con la multicausalidad, las epidemias, la comorbilidad, la polifarmacia y las interacciones entre el envejecimiento y la enfermedad (Lifshitz, 2010). La historia natural de las enfermedades, que hasta en 85 % devenía curación, "con médico, sin médico y a pesar del médico", cambió su horizonte clínico. Las enfermedades hoy consideradas complejas cursan con: comorbilidad, complicaciones y, hasta el momento, su principal tendencia es a la muerte.

La interacción médico-paciente ha sido sacudida y nos exige su revisión.

La complejidad como problema nos lleva a visitar nuestros conceptos y enfoques de la homeostasis, la salud, la enfermedad, la dinámica y las propiedades de los ritmos fisiológicos, la dinámica de las enfermedades y la búsqueda de nuevos blancos terapéuticos.

Existe también un tránsito de la complejidad como problema a la complejidad como explicación de los fenómenos y que estamos obligados a recorrer.

PROBLEMA DE SALUD PÚBLICA

Se han considerado enfermedades complejas la diabetes tipo 2, la obesidad, el síndrome metabólico, las enfermedades cardiovasculares –como la cardioangioes-

clerosis y la hipertensión arterial–, el cáncer, las enfermedades autoinmunes, el asma bronquial, la esquizofrenia y otros trastornos mentales, la septicemia y muchas otras.

En conjunto, se considera que las enfermedades complejas son causa de 65 % de los problemas de salud pública y representan los principales problemas de mortalidad; la diabetes y la obesidad, con sus complicaciones, se han convertido en una verdadera epidemia, sin precisar las cifras, se estima que habrá 200 millones de diabéticos en el mundo en proyecciones para 2040. La atención de estos padecimientos representa costos muy altos para los sistemas de salud.

ALGUNOS FUNDAMENTOS DE LA TRANSMISIÓN HEREDITARIA

En el gran escenario de las enfermedades complejas, a nivel micro encontramos el teatro celular y sus organelos; en el núcleo, el ácido desoxiribonucleico (DNA), actor fundamental que rige los aspectos esenciales de la replicación de los seres vivos. Su descubrimiento por Watson y Crick y la secuenciación del genoma humano 53 años después son de las conquistas más notables alcanzadas por nuestra civilización (Mansilla, 2006:39). El DNA y sus nucleótidos dispuestos en pares de bases se encuentran en el núcleo de la célula, conformando los genes en los cromosomas. A estos podemos clasificarlos en 44 autosomas y 2 cromosomas sexuales. Su replicación se lleva a cabo durante los procesos de mitosis y meiosis, en donde las correlaciones de los nucleótidos no sólo son locales sino además de largo alcance y con subprocesos múltiples que podemos identificar como los propios del genoma, transcriptoma, proteoma y metaboloma, y que son sujetos a la influencia de factores múltiples del ambiente. La interacción dialéctica de éstos nos dará el fenotipo resultante y, en general, sentará premisas para los procesos de salud o enfermedad.

La genética ha recorrido un fructífero camino investigando las fenocopias (alteraciones del fenotipo) y dilucidando si son producto de la naturaleza misma o del ambiente, nada fácil lo transitado hasta llegar al nivel biomolecular, pero hasta el momento en que se han identificado en el genoma humano de un total de 3 200 millones de bases, 20 mil a 25 mil genes, se han determinado los siguientes patrones de herencia (Solari, 2003:101):

1. Rasgos o enfermedades monogénicas con herencia mendeliana más o menos regular, como la hemofilia, la acondroplasia, la neurofibromatosis, la adrenoleucodistrofia y muchas otras.

2. Rasgos o enfermedades (complejas) de herencia multifactorial (Single Nucleotide Polimorphisms, SNP) con gran interacción con el ambiente como las que hemos mencionado con anterioridad en la sección sobre problema de salud pública

3. Enfermedades de origen cromosómico o cromosomopatías. Ejemplo de éstas son: el síndrome de Down, el de Turner y el del X (equis) frágil.

NIVELES DE ESTUDIO Y ENFOQUE PREDOMINANTE

El nivel de estudio privilegiado ha sido el genómico con los mapeos de ligamiento de los nucleótidos simples (SNP), se ha ampliado a nivel poblacional y, de hecho, de sus resultados se ha podido confirmar que es sólo con la interacción con el ambiente que puede o no presentarse la enfermedad. Algo muy positivo es que ha roto la ilusión de la era genómica en la que se argumentaba de la posibilidad para la identificación de genes específica para las más diversas cualidades de los individuos.

A nivel biomolecular se han estudiado las diversas enfermedades complejas, pero por supuesto la cantidad inconmensurable de datos necesarios para su conocimiento no tenía factibilidad de procesarse sino hasta años recientes.

A nivel fisiopatológico y de la clínica, la intuición médica ha logrado identificar algunos de los aspectos nodales de varios de estos padecimientos, sin embargo, todavía nos limita la metodología clásica.

La farmacología ha tendido a la farmacogenómica con poco éxito y el enfoque reduccionista llevó a considerar erróneamente incluso la terapia génica como la posible panacea del futuro y ha tenido en ocasiones fracasos estrepitosos como narra el doctor Pedro Miramontes (Miramontes, 2006:148).

De toda esta experiencia ha abrevado la comunidad científica que construye la ciencia de la complejidad, y ha sido ésta la que ha considerado como abierta una era posgenómica.

DIABETES TIPO 2 Y OBESIDAD COMO EJEMPLO DE ENFERMEDADES COMPLEJAS

Es bien sabido que la diabetes tipo 2 se había considerado como un trastorno en el metabolismo de la glucosa que dependía fundamentalmente de una deficiencia de insulina o falta de calidad en ésta, y por su frecuencia familiar se sospechaba una génesis hereditaria probablemente con patrones mendelianos y con estrecha relación con la obesidad. Su importancia como problema de salud consiste en complicaciones vasculares en diversos sitios, como alteración en los grandes y pequeños vasos como en la retina, el riñón, las arterias coronarias, en el cerebro y la piel, además de estados de descompensación metabólica que requieren del cuidado intensivo. La enfermedad per se y sus complicaciones se han convertido en las primeras causas de muerte y de secuelas invalidantes.

El esfuerzo por tener conocimientos más profundos ha generado por una parte una enorme cantidad de datos acerca de ella y su patogénesis (De Fronzo, 2004:787-835), pero por otra parte ha generado una gran cantidad de dudas, lo que puede constatarse en la revista *Science* de enero de 2005 y la relevancia que ésta le concede, considerándola dentro de las "enfermedades crónicas globales" en su editorial, y presentando una serie de artículos dedicados a la diabetes y obesidad en donde se pretende destacar los puntos nodales de estos padecimientos. La introducción a cargo de Paula A. Kiberstis nos plantea el gran escenario real al que denomina "un hartazgo de sospechas" (Kiberstis, 2005:369).

Los artículos destacan los factores genéticos (O’Rahilly, 2005:370), la relación entre obesidad y diabetes (Lazar, 2005:373), la relación entre diabetes, obesidad y cerebro (Schwartz, 2005:375), la vida y muerte de las células beta del páncreas (Rhodes, 2005:380) y la disfunción mitocondrial (Lowell, 2005:384); a lo largo de todos los trabajos en la escena del crimen –como diría la doctora Kiberstis– se encuentra una gran cantidad de “sospechosos metabólicos” y ambientales que, a su vez, nos generan también otra gran cantidad de sospechas.

Tal vez como diría Germinal Cocho (2005:126), “uno de los grandes retos que enfrenta la investigación biomédica es tratar de descubrir y ver cómo interactúan estos factores, de modo que se puedan realizar estrategias efectivas para el diagnóstico, la prevención y el tratamiento de dichas enfermedades”, refiriéndose también al resto de las enfermedades complejas.

Cuando ubicamos históricamente la obesidad, por las esculturas esteatopigias, la encontramos desde la prehistoria y las culturas antiguas, cuando muchos de los factores dietéticos actuales considerados relevantes no estaban presentes, también la hallamos en la Edad Media y después. ¿Qué en la génesis ha hecho que hasta la época actual haya alcanzado niveles de epidemia?

La diabetes es también de larga data, descrita como la “enfermedad de la orina dulce” cuando los médicos aún exploraban los humores de los pacientes exclusivamente con sus sentidos. Hay diabéticos que nunca padecieron obesidad y hay obesos extremos que nunca padecen diabetes.

Hay pacientes con genes “marcadores” de ambas enfermedades y no las padecen.

Hay animales obesos que no tienen hábitos que se han relacionado en los humanos con los padecimientos.

Sin embargo, pese a las muchas dudas puede decirse que se han venido identificando posibles parámetros de control. Por ejemplo, la realización de ejercicio físico, no fumar, control de peso, una dieta adecuada y control del estrés.

Si bien los estilos de vida desempeñan un papel relevante, tal vez algunos cofactores (dadas las características del despliegue epidémico) pudieran estar presentes en el ambiente. Dada la correlación con el ejercicio, es posible que el mecanismo físico de la tensegridad del organismo, estudiada por Donald Ingber y su equipo desde hace más de dos décadas, desempeñe un papel fundamental y que estemos ante las bases de una nueva fisiopatogenia (Ingber, 2003).

El cáncer es otra de las enfermedades crónicas cuya morbimortalidad y su estudio van aportando conocimiento en los genotipos, las conductas y factores de riesgo que han podido correlacionarse con el medioambiente.

No sólo ha sido relevante que se ha recuperado la importancia de la epigenesis en el fenotipo resultante, sino también que ha planteado a la oncología clínica superar el enfoque reduccionista, para la búsqueda de una aproximación sistémica y una visión biológica transdisciplinaria revisitando los diversos niveles de disfunción, con uso de las técnicas de las matemáticas no lineales.

En un magnífico artículo (Knox, 2010), Sarah S. Knox plantea la necesidad de un cambio paradigmático en el abordaje y tratamiento del cáncer. El sugerente título

habla por sí mismo: "From 'omics' to complex disease: a systems biology approach to geneenvironment interactions in cancer".

POSIBLE ENFOQUE Y NUEVAS HERRAMIENTAS

Lo que ha estado haciendo la ciencia de la complejidad no es, por supuesto, intentar descubrir "el hilo negro".

La humanidad no ha caminado "a tontas y a locas" ni los hechos son un mero desliz de la historia. La humanidad se propone siempre construir dentro de las posibilidades que le brindan las condiciones de las diferentes épocas históricas. Los humanos son los humanos de su tiempo.

Es preciso ubicar en la historia los "hilos de continuidad" para construir lo nuevo y también precisar con claridad la herencia a la que renunciamos.

Si bien voltear la mirada al pasado es imprescindible, requiere una actitud serena y no contemplativa para no padecer la "maldición bíblica" de quedar convertido en "estatua de sal", paralizado o bien pretender intentar regresar el camino de la historia.

En suma, la medicina del siglo XXI ofrece maravillosos recursos para la atención médica, pero también plantea desafíos inéditos que tendremos que armonizar con las tradiciones ancestrales (Lifshitz, 2010).

Un nuevo enfoque precisa retomar el aspecto esencial de la filosofía natural de un mundo material en donde la materia se encuentra organizada en diferentes escalas y sus propiedades espaciotemporales poseen características genéricas pero además tienen sus particularidades. La ciencia de la complejidad ha venido demostrando las propiedades genéricas que pueden poseer, por ejemplo, las redes metabólicas, una sociedad de hormigas, una red neuronal o una red social humana. El estudio de sistemas físicos relativamente simples, ha llevado a la comprensión de sistemas cada vez más complejos.

Debemos considerar la utilidad de la gran cantidad de información que nos brindó el enfoque reduccionista, y reconocer que la limitación fundamental del análisis era sumar los componentes sin la posibilidad de ver la interacción real de ellos, pese a ello la ciencia obtuvo grandes logros, es pertinente en este punto aclarar que la ciencia de la complejidad no es antirreduccionista en esencia. Hoy el análisis consiste en evaluar el sistema en sus diferentes escalas o subsistemas y conocer las propiedades que emergen de su coordinación o acoplamiento, es decir su dinámica, sus parámetros de orden y su interacción con el entorno para conocer sus parámetros de control. En algunos sistemas, es posible prescindir de algunas escalas, ello dependerá del nivel en que enfocamos nuestra atención. Sin embargo, al parecer en los organismos humanos un nivel transmina al otro y hay que estudiar todas las escalas.

Por supuesto, es imprescindible mencionar que hoy contamos con la poderosa herramienta de la computación para el procesamiento de datos de gran magnitud (de grano fino), y las posibilidades no sólo de análisis cuantitativos, sino además cualitativos que brindan información muy valiosa de la dinámica de los sistemas.

El auge del estudio de la inteligencia artificial dio origen a la consideración de dilucidar las redes neuronales y posteriormente nació la modelación y simulación para comprender otros sistemas complejos. Albert-László Barabási y Duncan Watts fueron los pioneros en teoría de redes, cuyo estudio y aplicación en años recientes se ha ampliado a diversas disciplinas como ciencias de la comunicación, sociología, epidemiología, matemáticas, biología, etc.

Una gran cantidad de sistemas complejos pueden estudiarse y caracterizarse mediante el análisis de redes; se han condensado unos cuantos modelos: redes simples, aleatorias, de mundo pequeño y libres de escala, y se han estudiado sus propiedades estadísticas como el grado de distribución, su longitud característica entre nodos y grado de aglutinación, que permiten establecer propiedades de su arquitectura, su vulnerabilidad, su robustez (tolerancia a fallas) y los nodos más relevantes.

Newman y Girvan, Guimera y Amaral, desarrollaron los primeros trabajos en redes metabólicas (Mitchel, 2006:2-6) describiendo los "roles" desempeñados por cada nodo. Se ha desarrollado una buena cantidad de trabajos en redes metabólicas estudiando principalmente microorganismos.

Es posible, a partir de la gran cantidad de datos recopilados de la fenomenología de las enfermedades, la construcción de las redes metabólicas para su análisis. Para la definición de los nodos y sus conexiones, pueden utilizarse gráficas de sustratos, de reacciones, de enzimas o combinación de las anteriores, ubicando conexiones tanto directas como indirectas. Como ejemplo, pueden consultarse los trabajos de la Universidad de Shanghai de China (Zhao, Ping, 2007:1-15).

Así como pudiera estudiarse la red interna del organismo, pudiera hacerse con la red externa, es decir, los factores del ambiente, y correlacionarlas. La estrategia sería buscar los nodos o el nodo relevante, el parámetro de orden cuyo control permita vencer la enfermedad (Cocho, 2005:127).

LA RED EXTERNA, SISTEMAS DE SALUD Y USUARIOS

Hay, por supuesto, en la red externa factores muy relevantes para la producción de las enfermedades complejas, las condicionantes socioeconómicas que improntan la disponibilidad de nutrimentos, la educación, el acceso a los sistemas de salud y la posibilidad de un control de crecimiento y desarrollo, así como la detección temprana de factores de riesgo para tal o cual padecimiento, además la calidad de los sistemas mismos de salud.

La calidad de los sistemas de salud está fundamentalmente vinculada a la voluntad política del gobierno y ésta, por supuesto, a la clase en el poder. La riqueza o pobreza de una nación no lo es todo. Esto explica por qué Cuba tiene el índice de mortalidad infantil más bajo de América, similar al de Canadá, y no sólo soluciona sus propios problemas, sino que además exporta salud con generosa solidaridad.

La seguridad social fue producto esencialmente de las reivindicaciones de los trabajadores y se ha pretendido socavar su infraestructura y calidad. Si bien los sistemas son insuficientes, someterlos a condiciones límite ha significado condiciones no favorables para la prevención, promoción, curación y rehabilitación.

El componente más numeroso del sistema de salud son los usuarios, pero en su mayoría no se les considera parte de él; el flujo de información es vertical y, por lo tanto, la coordinación y el acoplamiento, que como componentes deben tener, no se logra. Uno de los problemas fundamentales para aplicar los parámetros de control que antes hemos mencionado es, por diversos motivos, la dificultad en la relación médico-paciente, no sólo en la empatía sino además en la profundidad requerida para que este último adquiera la sensibilidad y el conocimiento necesarios (empoderamiento) de sus problemas para resolverlos.

COMUNIDADES DE PRÁCTICA

En donde quiera que haya organización social formal, sobre todo si las estructuras formales son redes jerárquicas y verticales, aparecerán estructuras informales que en ocasiones tienden a mejorar el funcionamiento del sistema y en otras pueden constituirse en mafias.

Germinal Cocho describe las comunidades de práctica (Cocho, 2006:20) como redes informales que coexisten con la estructura formal de las organizaciones y sirven para propósitos tales como resolver conflictos entre las metas de la institución a la que pertenecen, resolver problemas de modo más eficiente y ayudar a alcanzar los objetivos de sus miembros.

Algunos sistemas de salud han tratado de propiciar este tipo de comunidades, tal es el caso de los clubes del diabético, las comunidades de ayuda mutua, el aval ciudadano, etc.; aunque los resultados no son del todo satisfactorios, son deseables.

En parte del capítulo de Germinal Cocho (2005:123-128) se describen los aspectos deseables para estudiarlas, además de plantear la utilidad de los puentes, interfases inteligentes y objetos fronterizos para su implementación.

Las comunidades de práctica pueden ser un espacio en donde sean los propios pacientes quienes organicen lo necesario para su aprendizaje, llenen los vacíos dejados por una atención insuficiente, se potencien en motivos comunes y, además, se inserten en un sistema de salud (del que son parte integrante) y lo mejoren con propuestas. Es un instrumento deseable y de gran utilidad en padecimientos como la obesidad y diabetes en pacientes con estilos de vida que comparten en redes espacio-temporales y se mueven a tres grados de separación como han mostrado (Christakis y Fowler, 2007). Al identificar estas redes, puede dirigirse una intervención más racionalizada dirigida a los nodos fundamentales, dicha intervención es posible con instrumentación de promoción de la salud. Mediante una estrategia no sólo de comunidades reales, sino además virtuales con flujos de información ad hoc, los efectos pudieran diseminarse a toda la red.

Mencionamos el abordaje posible mediante el análisis de redes, pero hay más herramientas como el análisis de la dinámica de un padecimiento mediante series

de tiempo y reconstrucción de atractores, análisis de variedad multiescala, minería de datos y otras.

Se ha desarrollado el tema con la idea fundamental de mostrar que el problema de las enfermedades complejas es un puente entre paradigmas, donde con seguridad tendremos puntos de encuentro y la posibilidad de tender otros puentes entre actores de diversas disciplinas.

Por último, como concluiría Lifshitz en su artículo “La interdisciplina al servicio del paciente”: la separación del saber humano por disciplinas y especialidades no deja de ser un tanto artificiosa, en la medida en que pueden confluir hacia un propósito preciso. Las diferencias metodológicas e instrumentales se constituyen en complementarias en tanto se apliquen a un fin común. La medicina clínica es un buen ejemplo de ello (Lifshitz, 2011).

Algo seguro es que cuando nace un nuevo paradigma, obtenemos nuevas visiones de los problemas y, por supuesto, una apertura de nuevas perspectivas.

Los caminos nuevos parecen difíciles, transitar y conocer lo que pudiera lograr la sentencia enormemente provocadora del doctor Germinal Cocho: “No hay nada más sencillo que lo complejo”.

BIBLIOGRAFÍA

- Craig, J. J. 2008. Complex diseases: research and applications. *Nature Education*, 1(1):184.
- Christakis, N., Fowler, J. 2007. The spread of obesity in a large social network over 32 years. *N Engl J Med.*, 357:370–9.
- DeFronzo, R. A. 2004. Pathogenesis of type 2 diabetes mellitus. *Med Clin North Am.*, 88(4):787–835, ix.
- Jing Zhao, Lin T., Hong Y., Jian-Hua L., Cao Z., Yixue L. 2007. Bow tie topological features of metabolic networks and the functional significance. *Chin Sci Bull.*, 52:1036–45.
- Ingber, D. 2003. Tensegrity I. Cell structure and hierarchical systems biology. *J Cell Sci.*, 116:1157–73.
- Ingber, D. 2003. Tensegrity II. How structural networks influence cellular information processing networks. *J Cell Sci.*, 116:1397–408.
- Kiberstis, P. 2005. A surfeit of suspects. *Science*, 307(5708):369.
- Knox, S. S. 2010. From ‘omics’ to complex disease: a systems biology approach to gene environment interactions in cancer. *Cancer Cell Int.*, 10:11.
- Lazar, M. A. 2005. How obesity causes diabetes: not a tall tale. *Science*, 307(5708):373–5.
- Lifshitz, A. 2011. La interdisciplina al servicio del paciente. *Ludus Vitalis*, XIX(35):213–4.
- Lifshitz, A. 2010. La práctica médica en los albores del siglo XXI. *Cir Cir.*, 78(6):469.
- Lowell, B. B., Shulman, G.I. 2005. Mitochondrial dysfunction and type 2 diabetes. *Science*, 307(5708):384–7.
- Mitchell, M. 2006. *Complex Systems: network thinking*. Portland State USA: Elsevier Science.
- O’Rahilly, S., Barroso, I., Wareham, N. J. 2005. Genetic factors in type 2 diabetes: the end of the beginning? *Science*, 307(5708):370–3.
- Ruelas, E., Mansilla, R., Rosado, J. (coords.). 2006. *Las ciencias de la complejidad y la innovación médica. Ensayos y modelos*. México: Secretaría de Salud / Instituto de Física, CEIICH-UNAM.

- Ruelas, E., Mansilla, R. (coords.). 2005. *Las ciencias de la complejidad y la innovación médica*. México: Secretaría de Salud / CEIICH-UNAM / Plaza y Valdés.
- Schwartz, M. W., Porte D. Jr. 2005. Diabetes, obesity, and the brain. *Science*, 307 (5708):375–379.
- Solari, A. J. 2003. *Genética humana*. Argentina: Editorial Panamericana.
- Rhodes, C. 2005. Type 2 diabetes a matter of b-cell life and death? *Science*, 307 (5708):380–4.

⊙ *Esta es una página en blanco.* ⊙

LA ESTRUCTURA DE CORRELACIONES LOCALES DEL ADN Y SUS PARÁMETROS TERMODINÁMICOS*

In fact, all epistemologic value of the theory of probability is based in this: that large-scale random phenomena in their collective action create strict, non-random regularity.

B. V. Gnedenko y A. N. Kolmogorov, (1968) [1].

1. INTRODUCCIÓN

DURANTE buena parte de su existencia, la biología ha sido una actividad recolectora de datos. Desde los biólogos naturalistas viajando alrededor de los cuatro puntos cardinales en busca de especímenes, hasta la recolección moderna de genes y sus productos, la biología ha generado un extenso acervo de los más diversos objetos.

Ese estilo de trabajo nos ha llevado al momento actual en el que tenemos una gran cantidad de información, una verdadera inundación de datos que no han sido suficientemente estudiados y que, por lo tanto, no se han incorporado al conocimiento científico. Un ejemplo impresionante de la recolección sin idea clara de lo que posteriormente se va a hacer con el resultado es la culminación del proyecto del genoma humano que ha traído consigo poca información que nos ayude a encontrar respuestas a las interrogantes que plantea la evolución y funcionamiento de nuestra especie, lo que hace que sea sumamente importante la investigación de principios organizadores restrictivos y puentes conceptuales que restrinjan la gran diversidad de estos datos (organismos, poblaciones, genes, etcétera), diversidad que en lo fundamental pudiera ser en gran parte aparente.

La búsqueda de leyes y principios generales no es nueva en las ciencias de la vida. A finales del siglo XVIII y comienzos del XIX, surgió una corriente que buscaba invariantes ahistóricos en el desarrollo de los seres vivos. Esta escuela, la llamada “morfología racional” buscaba, en palabras de Hans Driesch [2]:

... Hallar aquello que es lo arquetípico en las variedades de la forma y llevarlo a un sistema que no necesariamente debería estar determinado históricamente, sino que fuera inteligible desde un punto de vista racional.

* Ensayo escrito por Pedro Miramontes y Germinal Cocho. Publicado en: García-Colín Scherer, L., Dagdug, L., Miramontes, P., y Rojo, A. (coords.), 2006. *La física biológica en México. Temas selectos*. México: El Colegio Nacional.

Tal era el propósito de Etienne Geoffroy Saint-Hilaire, Richard Owen y los otros fundadores de la anatomía comparada; las homologías entre los esqueletos de los vertebrados no podían ser obra de la casualidad, tenían que ser parte de leyes accesibles a la mente humana.

Sin embargo, el darwinismo (cuya propuesta de mecanismo para la evolución de los seres vivos se basa en la narración histórica de fenómenos únicos e irrepetibles) tuvo un éxito tal que no dejó espacio para otro tipo de propuestas y el programa de la morfología racional cayó en el olvido. Es por esto que, a contracorriente, destaca la labor de gigantes intelectuales como D'Arcy Wentworth Thompson, quien en su monumental obra *On Growth and Form* [3] recoge y reivindica los fundamentos científicos de la anatomía comparada y señala que la vida, por diversa que parezca, tiene que sujetarse a las leyes naturales. Los objetos, vivos o no, responden de la misma manera ante la ley de la gravedad, las leyes de la termodinámica, el electromagnetismo y los sistemas complejos.

Esta obediencia impone restricciones muy fuertes que disminuyen dramáticamente la diversidad de formas en el mundo vivo y acotan el papel del azar (tan caro a la hipótesis de la selección natural) en la evolución de las especies. El conjunto de lo viable es infinitamente menor que el de lo imaginable, aun en el supuesto extremo de que el azar jugara algún papel en la evolución y desarrollo de los seres vivos; en las escalas de tiempo que maneja la biología evolutiva, tal azar o bien es indistinguible del caos determinístico de alta dimensionalidad o, por otra parte (y según Gnedenko y Kolmogorov), en el largo plazo la acción colectiva de los integrantes de un sistema es regular aunque provenga de fenómenos aleatorios en sus componentes individuales.

En este contexto, en este ensayo mostramos un ejemplo de cómo las leyes de la física acotan el espacio de posibilidades en un campo específico: la estructura del ADN. Hemos estudiado las implicaciones de las restricciones termodinámicas y estructurales, mostrando, en particular, la utilidad del pensamiento teórico en biología al resolver una controversia.

2. EL ADN

En 1953 James Watson y Francis Crick publicaron su modelo de estructura tridimensional de la molécula del ADN. Para esta época ya se sabía que la información genética estaba en los cromosomas pero no se conocía con certeza el aspecto del ADN. Quedaba la interrogante de la relación entre la estructura y su función que, en buena medida, persiste para algunos rasgos.

El ADN no es únicamente la bodega de la información genética ni mucho menos posee propiedades que la voz pública le otorga, tales como la capacidad de autorreproducción; el ADN es una de las moléculas más inertes que hay en las células y no tiene más capacidad de duplicación que un impreso con el que se alimenta una máquina *xerox*. Por otra parte, el ADN es causa y efecto de procesos moleculares sumamente complejos que involucran máquinas moleculares asociadas a los procesos de replicación, transcripción y traducción.

La eficiencia y precisión de estas máquinas moleculares depende localmente de la secuencia primaria y este hecho impone un sesgo en el tipo y cantidad de patrones de ADN independientemente de su función específica. Si bien existen mecanismos que implican correlaciones de mediano o largo alcance, como la acción de las topoisomerasas [4] o la organización de los nucleosomas, los principales procesos de la dinámica del ADN están subordinados a parámetros termodinámicos que, a su vez, dependen únicamente de la distribución local de dímeros a lo largo de la secuencia [5].

Una de las variables más importantes para los procesos locales es la estabilidad del dúplex (la menor o mayor dificultad para abrirlo). Dicha variable se parametriza mediante la energía libre del complejo y depende de la sucesión primaria. La intuición nos dice que la molécula será más estable en aquellos lugares donde la abundancia de bases fuertes (guanina y citosina) sea mayor, puesto que éstas se unen entre sí de un lado del dúplex al complementario, mediante enlaces triples de hidrógeno, mientras que las bases débiles (timina y adenina) lo hacen mediante enlaces dobles. La intuición es correcta a medias; la estabilidad depende de la composición local de los dímeros (bases consecutivas a lo largo de un lado del dúplex) pues además de los puentes de hidrógeno que unen las bases complementarias, también existe una dependencia entre bases cruzadas (figura 1) que dependen del efecto de apilamiento. Los procesos de duplicación y transcripción del ADN dependen de que la doble hélice se abra. Por lo mismo queda clara la utilidad de tener tablas de energía libre lo más exactas posible.

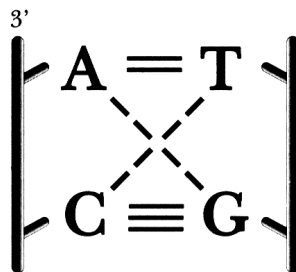


Figura 1: Dos bases consecutivas a lo largo de la molécula de ADN con sus correspondientes bases complementarias. Las líneas continuas entre las bases complementarias representan puentes de hidrógeno mientras que las fragmentadas representan interacciones debidas al efecto del apilamiento, principalmente fuerzas de Van der Waals.

3. LA ENERGÍA LIBRE

Existen cálculos de la energía libre (ΔG_{ij}) para los dieciséis pares posibles de dímeros (en realidad, siempre se reportan solamente las diez que son independientes entre sí). En un artículo reciente, SantaLucia [13] compara valores para la energía libre de los dímeros a lo largo de una cadena, que han sido reportados por sie-

te equipos independientes (tabla 1). Los distintos laboratorios emplearon diversas técnicas para la determinación de la energía libre, utilizando tanto oligos naturales como sintéticos, distintas concentraciones de cationes y protocolos diversos. Siendo que el objeto a medir es el mismo (la energía libre de los vecinos próximos) es de esperar que los resultados fueran muy cercanos entre sí. Desgraciadamente la realidad es otra. SantaLucia encontró que los resultados de seis laboratorios coincidían más o menos entre sí, mientras que el restante (Breslauer *et al.* [9]) mostraba una marcada diferencia. La conclusión de SantaLucia fue la natural, y como no es posible determinar el valor correcto a partir de primeros principios, entonces éste debería ser parecido al de la mayoría y, consecuentemente, el resultado de Breslauer sería incorrecto. Los resultados están plasmados en la tabla 1. Solamente incluimos seis de los siete reportes pues el equipo de Benight [15] revisó sus resultados después de la aparición del artículo de SantaLucia.

Interacción	Gotoh	Vologodskii	Breslauer	Delcourt	Sugimoto	Unificado
AA/TT	0.43	0.89	1.66	0.67	1.20	1.00
AT/TA	0.27	0.81	1.19	0.62	0.90	0.88
TA/AT	0.22	0.76	0.76	0.70	0.90	0.58
CA/GT	0.97	1.37	1.80	1.19	1.70	1.45
GT/CA	0.98	1.35	1.13	1.28	1.50	1.44
CT/GA	0.83	1.16	1.35	1.17	1.50	1.28
GA/CT	0.93	1.25	1.41	1.12	1.50	1.30
CG/GC	1.70	1.99	3.28	1.87	2.80	2.17
GC/CG	1.64	1.96	2.82	1.85	2.30	2.24
GG/CC	1.22	1.64	2.75	1.55	2.10	1.84

Tabla 1: Valores absolutos de la energía libre (ΔG_{ij} (kcal/mol)) para las diez posibles interacciones de los dímeros con sus complementos. Tomada de [11].

4. LA DISTRIBUCIÓN DE LOS DÍMEROS EN EL ADN

¿Cómo resolver la controversia? Vamos a mostrar que una combinación de interdisciplina, pensamiento teórico y genómica puede dar resultados sorprendentes. Primero medimos el efecto de la distribución de los dímeros en la organización del ADN, utilizando la función de correlación. Para esto se calcula la frecuencia relativa de los nucleótidos:

$$f_i = \frac{N_i}{N}$$

donde N es el tamaño (en bases) de la secuencia y el índice i corre sobre $\{A, C, G, T\}$. Análogamente se calcula la frecuencia de que la base i sea seguida de la base j ,

$$f_{ij} = \frac{N_i N_j}{(N-1)}$$

y con estos elementos se define la función de correlación:

$$C_{ij} = f_{ij} - f_i f_j \quad (1)$$

el signo de C_{ij} indica si el dímero ij se encuentra sobre o subrepresentado respecto a lo que cabría esperar de una distribución al azar.

Por otra parte, cuando se tiene un sistema en el cual la energía se puede distribuir en muchos modos o elementos, la mecánica estadística nos enseña que corresponden menores frecuencias relativas a aquellos modos con mayor energía. Por ejemplo, se ha reportado que la frecuencia con la que aparece el dímero TA es menor que la de una distribución azarosa [5], lo que podría deberse a la baja energía de enlace (alta energía libre ΔG_{TA}) de este dímero pero, a ciencia cierta no se sabe si este hecho tiene algún trasfondo biológico o si es una restricción física neutral.

Específicamente, se espera que:

$$C_{ij} \propto \exp\left(-\frac{\Delta G_{ij}}{kT}\right)$$

donde T es la temperatura absoluta y k es la constante de Boltzmann. Bajo el supuesto de que

$$\frac{\Delta G_{ij}}{kT}$$

sea pequeña (que el dúplex sea débil), podemos aproximar C_{ij} por su parte lineal

$$C_{ij} \propto \left(1 - \frac{\Delta G_{ij}}{kT}\right)$$

y por tanto, postular la siguiente relación lineal:

$$C_{ij} = a + b\Delta G_{ij} \quad (2)$$

con a y b constantes. Sin embargo, la relación anterior no puede ser válida para todo el rango de dímeros pues existen reglas de suma que imponen restricciones que son antagónicas con la ecuación anterior. La expresión funcional de C_{ij} será el resultado del conflicto entre la termodinámica y las reglas de suma.

La columna de la tabla 1 que sea consistente con las condiciones *in vivo* debe satisfacer la ecuación (2) dentro de las restricciones de las reglas de suma y para bajos valores de la energía libre. El sentido preciso de estas dos condiciones será aclarado en la siguiente sección.

5. REGLAS DE SUMA

La función de correlación local (1) tiene algunas propiedades muy importantes, entre otras:

$$\sum_i C_{ij} = \sum_j C_{ij} = 0$$

Este resultado se sigue directamente de la definición de la función de correlación. En efecto

$$\sum_i C_{ij} = \sum_i f_{ij} - f_j \sum_i f_i = f_j - f_j$$

En particular, se tiene que para bases fuertes (s) y débiles (w)

$$C_{ss} = C_{ww} = -C_{sw} = -C_{ws}$$

donde, luego de haber postulado (2) $C_{ij} = a + b\Delta G_{ij}$, se sigue que:

$$4a + b \sum_i \Delta G_{ij} = 0$$

y por ende

$$\sum_i \Delta G_{ij} = \text{constante} \quad (3)$$

Esta restricción analítica no es satisfecha por las columnas de ΔG_{ij} de la tabla 1 en todo su rango. Para convencerse de ello, basta tomar una columna cualquiera, digamos la de Breslauer, y hacer las cuentas,

$$\sum_i \Delta G_{Ci} = 9.18$$

mientras que

$$\sum_i \Delta G_{Ti} = 5.63$$

esto nos da la medida del alcance de la aproximación lineal si excluimos los sumandos que corresponden a interacciones fuerte-fuerte, entonces (2) se cumple dentro de un muy buen seis por ciento de error, en el peor de los casos, para todas las columnas de la tabla.

Luego entonces, podemos predecir que la relación lineal (2) entre C_{ij} y ΔG_{ij} efectivamente se cumple para valores pequeños de la energía donde el sentido de "pequeño" es preciso y quiere decir para todos los dímeros exceptuando CC, CG, GC y GG.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calculamos C_{ij} en una muestra de doce organismos (todos genomas completos, menos dos) que representan a los superreinos eukaryota, archaebacteria y eubacteria. La tabla con los valores numéricos se puede consultar en [18]. Para juzgar nuestra predicción (2) graficamos C_{ij} vs. ΔG_{ij} para los doce organismos y las seis tablas de energía. Como el número de gráficas es muy grande, únicamente vamos

	$\sum_i \Delta G_{Ti}$	$\sum_i \Delta G_{Ai}$
Gotoh (ref.4)	2.55	2.51
Vologodskii (ref.5)	4.27	4.21
Breslauer (ref.6)	5.63	5.33
Sugimoto (ref.8)	5.30	5.10
Unified (ref.9)	4.33	4.60
Delcourt (ref.7)	3.68	3.74

Tabla 2

a mostrar unas cuantas que son significativas para la visualización de los resultados; de cualquier modo, la prueba final es la bondad del ajuste (fig. 4) entre las dos variables para todos los casos. Las figs. 2 y 3 muestran la gráfica de todos los euclidianos analizados para la tabla de Breslauer y la de Delcourt, respectivamente.

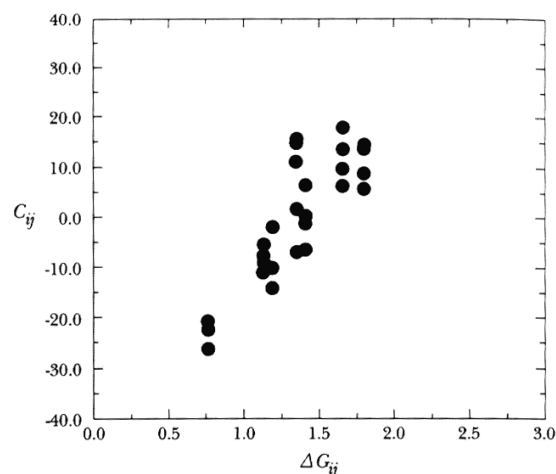


Figura 2: Gráfica de la energía libre ΔG_{ij} vs. la función de correlación C_{ij} para los valores reportados por Breslauer [9].

En la figura 4 se puede notar que la columna que corresponde al reporte de Breslauer tiene sistemáticamente (con una excepción que discutiremos más adelante) los valores más altos. Para el propósito de este trabajo lo importante es destacar que los resultados de Breslauer coinciden con nuestra predicción. Sin meternos a la discusión acerca de sus bondades y de qué protocolo de laboratorio es mejor que los demás, estamos en posición de afirmar que la tabla de Breslauer es la mejor a la luz de la genómica, pese a que no concuerde con la mayoría de SantaLucia [13].

Como se sabe, la mayor parte del genoma humano no se encuentra sujeta a las restricciones derivadas de la codificación de polipéptidos. Por ello incluimos la gráfica que corresponde exclusivamente a los exones del genoma humano (figura 5) y, como se puede apreciar no hay diferencia alguna.

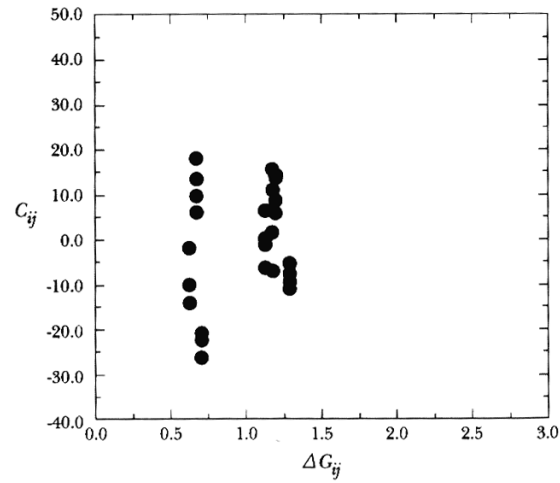


Figura 3: Gráfica de la energía libre ΔG_{ij} vs. la función de correlación C_{ij} para los valores reportados por Delcourt [10].

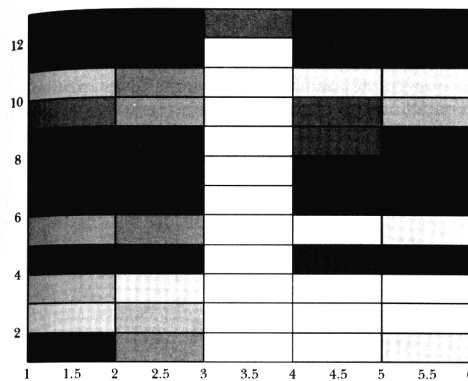


Figura 4: Coeficiente r de correlación lineal (no confundir con la función de correlación, r mide la bondad del ajuste lineal) entre ΔG_{ij} y C_{ij} para los doce organismos más los exones del genoma humano. Hay que tomar nota de la prevalencia de la cuarta columna (columna de Breslauer) [9]. Los cuadros más claros corresponden a las correlaciones lineales más altas. La tabla con los valores numéricos se puede consultar en [18].

Los datos de Breslauer son los mejores con una excepción: *Halobacterium sp.*, cuyo coeficiente r es bajo (los otros laboratorios no lo hacen mejor). Una explicación razonable pudiera basarse en el hecho de que esta especie vive en condiciones de salinidad extrema [16] y la interacción entre cationes y el ADN pudiera llevar consigo restricciones físicas no tomadas en cuenta en nuestro trabajo.

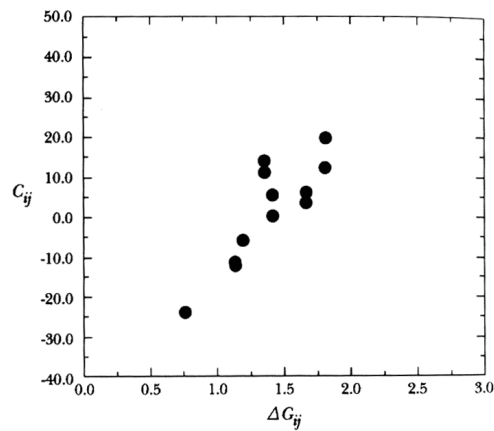


Figura 5: Gráfica de la energía libre ΔG_{ij} vs. la función de correlación C_{ij} para los exones del genoma humano.

7. CONCLUSIONES

El papel de la teoría en la biología sigue siendo objeto de debate para algunos. En su libro *How Nature Works* [17] el recientemente fallecido físico danés Per Bak relata la siguiente anécdota: habiendo coincidido en una cena con el eminente paleontólogo, autor del fenómeno del equilibrio punteado en la evolución biológica, Stephen Jay Gould (otro deceso muy lamentado), Bak le hizo el siguiente comentario: "... el descubrimiento del equilibrio punteado me parece maravilloso, yo pienso que bien vale la pena elaborar una teoría". Gould, sin ocultar su molestia respondió fríamente: "ya es una teoría". Este detalle ilustra que, al menos para este gran científico, la constatación de un hecho ya es *per se* una teoría.

En este trabajo hemos querido mostrar por medio de un ejemplo, que incluso una colección de resultados experimentales muy elaborados puede estar lejos de explicar un fenómeno, si no va acompañada de un marco conceptual apropiado. Los experimentos *in vitro* son una aproximación a lo que sucede en el interior de las células, en donde siempre va a haber factores difíciles de ser tomados en cuenta en el laboratorio. Es necesario un puente conceptual para salvar el escollo.

REFERENCIAS

- [1] Gnedenko, B. V. and Kolmogorov, A. N., *Limit distributions for sums of independent variables* (1968). Addison-Wesley Series in Statistics, Addison-Wesley, Reading, MA.
- [2] Citado en Kauffman, S. A., *The Origins of Order* (1993). Oxford University Press, New York.
- [3] Thompson, D'Arcy W., *On Growth and Form* (1992). Dover Publications, New York.
- [4] Brown, T. A., *Genomes* (1999). John Wiley and Sons, New York.
- [5] Miramontes, P., Medrano, L., Cerpa, C., Cedergren, R., Ferbeyre, G. & Cocho, G., (1995). *J. Mol. Evol.* 40: 698–704.
- [6] Karlin, S. & Mrázek, (1996). *J. Mol. Biol.* 262: 459–472.
- [7] Gotoh, O. & Tagashira, Y., (1981). *Biopolymers* 20: 1033–1042.
- [8] Vologodskii, A. V., Amirikyan, B. R., Lyubichenko, Y. L., Frank-Kamenetskii, M. D., (1984). *J. Biomol. Struct. Dyn.* 2: 131–148.
- [9] Breslauer, K. J., Frank, F., Blöcker, H. & Marky, L. A., (1986). *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 83: 3746–3750.
- [10] Delcourt, S. G & Blake, R.D., (1991). *J. Biol. Chem.* 266: 15160–15169.
- [11] Sugimoto, N., Nakano, S., Yoneyama, M. & Honda K., (1996). *Nucleic Acids Res.* 24: 4501–4505.
- [12] Allawi, H. T. & SantaLucia, J., (1997). *Biochemistry* 36: 10581–10594.
- [13] SantaLucia, J., (1998). *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 95: 1460–1465.
- [14] Doktycz, M. J., Goldstein, R. F., Paner, T. M., Gallo, F. J. & Benight, A. S., (1992). *Biopolymers* 32: 849–864.
- [15] Owczarzy, R., Vallone, P. M., Goldstein, R. F. & Benight, A. S., (1999). *Biopolymers* 52: 29–56.
- [16] Frolow, F., Harel, M., Sussman, J. L., Mevarech, M. & Shoham, M., (1996). *Nat. Struct. Biol.* 3: 452–458.
- [17] Bak, Per, *How Nature Works* (1996). Springer-Verlag, New York.
- [18] Miramontes, P. and Cocho, G. (2003). *Physica A*, 312: 577–586.

APROXIMACIONES DE LA FÍSICA HACIA EL SIDA *

1. INTRODUCCIÓN

LA FECHA, el síndrome de inmunodeficiencia humana (SIDA) es incurable. La epidemia se ha propagado a todos los confines de nuestro planeta y el número de personas infectadas por el virus de inmunodeficiencia humana (VIH) continúa creciendo. Desde que se identificaron los primeros casos de SIDA en 1981, han fallecido más de 20 millones de personas. Una región particularmente dramática es el África subsahariana en donde una de cada doce personas está infectada, de las cuales un poco más de la mitad son mujeres. En México el problema es grave también; según estimaciones de la Secretaría de Salud, alrededor del 0.45% de la población de nuestro país está infectada por el VIH y de estar confinada a núcleos de hombres homosexuales, en estos momentos la enfermedad se transmite principalmente entre la población abierta heterosexual. Es en la población femenina en donde más rápidamente ha aumentado la tasa de infección, representando cerca del 16% del total de los casos en México. El contagio se da por vía sexual, inyecciones asociadas al uso de drogas, o de madre a hijo, principalmente por la lactancia (70% de los casos), pero también durante el embarazo y el parto.

Este triste panorama se origina en el hecho de que el VIH infecta a células del sistema inmunológico, el cual normalmente nos defiende de las agresiones del exterior y nos define como seres fisiológicos únicos. El sistema inmunológico está constituido por varios subsistemas de células y mensajeros moleculares que ante la presencia de un agente externo al organismo (antígeno), generan un conjunto de instrucciones activadoras e inhibitorias de la respuesta inmunológica con el fin de destruirlo, pero preservando al individuo. En la infección por el VIH, este mecanismo funciona de manera anómala, ya que el receptor infectivo viral, la glucoproteína gp120, tiene gran afinidad por los receptores moleculares del tipo CD4, expresados en la membranas de los linfocitos T-CD4 y los macrófagos, a los cuales se une el VIH para inyectarles su material genético; al activarse estas células para generar una respuesta inmunológica, simultáneamente producen más virus. En consecuencia, una vez instalado el virus en el organismo, éste cae en un círculo vicioso del que no le es posible escapar. En las figuras 1 y 2, mostramos un diagrama del virus y su ciclo de reproducción.

* Ensayo escrito por Carlos Villarreal, Paola Ballesteros, Evangelina Figueroa, Leonor Huerta y Germinal Cocho. Publicado en: García-Colín Scherer, L., Dagdug, L., Miramontes, P., y Rojo, A. (coords.), 2006. *La física biológica en México. Temas selectos*. México: El Colegio Nacional.

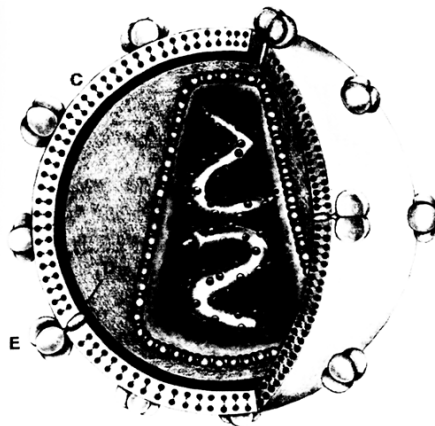


Figura 1: El VIH está constituido por un núcleo con forma de cono truncado en el interior de una envoltura esférica (A). El núcleo está formado por proteínas y en su interior se encuentran dos filamentos de ácido ribonucleico (ARN) que codifican la información genética del virus (B). Por otro lado, la membrana exterior está formada por una bicapa lipídica (C), cuya función es aislar al núcleo viral del medio acuoso exterior. Adosados a la membrana aparecen empotrados de manera bastante simétrica, receptores proteínicos con una alta afinidad por las moléculas CD4 expresadas en la superficie de los linfocitos T coadyuvantes y los macrófagos. El cuerpo del receptor que está enclavado en la membrana viral, está constituido por la proteína gp41 (D), mientras que la cabeza que sobresale de ella está cubierta por la proteína gp120 (E), la cual es utilizada por el virus para anclarse en aquellas células por las que tiene afinidad, infectarlas y utilizarlas en su proceso reproductivo. Dibujo de Estefanía Quesnel.

A pesar de la presencia constante del virus en el organismo, éste funciona en general con bastante normalidad; sin embargo, se observa la disminución paulatina de los linfocitos T-CD4 en la sangre, desde 600 por mm^3 al inicio del periodo asintomático, hasta unos 200 por mm^3 cuando se manifiestan los síntomas asociados al SIDA. También se aprecia una hiperactividad inmunológica en los ganglios linfáticos y los parches de Peyer intestinales, así como una degeneración gradual de sus centros germinales, que son regiones en las que se instala preferentemente el VIH. Cuando la atrofia de estos centros se hace considerable termina el periodo de latencia de la enfermedad y aparece la sintomatología asociada al SIDA.

En lo que sigue presentaremos dos enfoques alternativos que hemos empleado en el estudio de la complicada dinámica derivada de la infección por el VIH. En el primero, de tipo microscópico, se estudia la preferencia del VIH para infectar ciertos tipos de células y su relación con las interacciones de las proteínas que constituyen los receptores virales. En el segundo, de tipo mesoscópico, se modela la dinámica del VIH alojado en distintos compartimentos del organismo ante la administración de fármacos antivirales. Por último, se discuten diferencias en la infección por VIH asociadas al género.

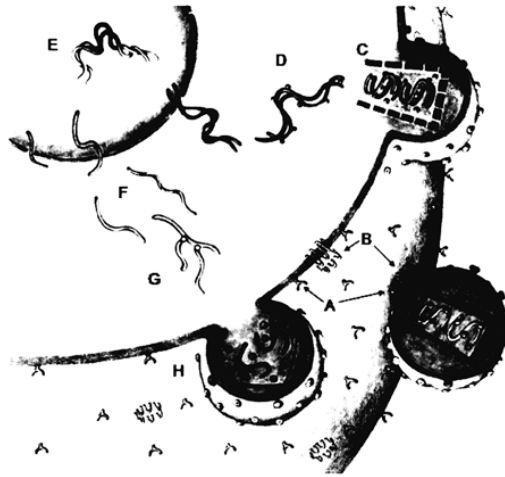


Figura 2: El proceso de infección inicia por el reconocimiento y unión de la proteína gp120 con las moléculas CD4, expresadas principalmente en la superficie de los linfocitos T coadyuvantes y los macrófagos (A). Sin embargo, para que ocurra la fusión es preciso que ocurran cambios estructurales en la gp120 que permitan su interacción con un segundo coreceptor de quimiocina (B), el cual puede ser del tipo CCR5 o CXCR4, dependiendo del tropismo infeccioso viral (M-trópico o T-trópico, respectivamente). Posteriormente se inicia, mediante la interacción de la gp41 con otros receptores celulares, el proceso de fusión durante el cual el VIH introduce su material genético en la célula (C). En su interior, el ARN viral se transforma en ADN por medio de la acción de la enzima transcriptasa inversa (D). Así, el recién formado genoma viral se integra al núcleo celular (E), en donde puede permanecer en estado latente hasta que, activada la célula por la presencia de un antígeno, comienza a fabricar largas cadenas peptídicas virales (F), las cuales deben ser seccionadas con ayuda de la enzima proteasa para generar proteínas pequeñas (G) que se usarán en la construcción viral. En cuanto a la cubierta exterior, los virus simplemente toman prestada parte de la membrana celular (H) y salen a reiniciar el ciclo infeccioso. Las terapias tienen como propósito interferir con alguno de los pasos anteriores. Dibujo de Estefanía Quesnel.

2. TROPISMO INFECCIOSO Y ESTRUCTURA VIRAL

Por tratarse de un retrovirus, el material genético del VIH está constituido por ácido ribonucleico (ARN) en vez del ácido desoxirribonucleico (ADN) de la mayoría de los seres vivos. El mecanismo de transcripción asociado al ARN es bastante imperfecto y produce una mutación por cada mil pares de nucleótidos, que es el tamaño aproximado del genoma viral; por lo tanto, en cada ciclo de replicación aparece una generación de virus distintos, dando lugar a una enorme diversidad de subespecies virales. Este factor ha imposibilitado hasta ahora el desarrollo de vacunas efectivas contra el SIDA.

Las diferentes cepas pueden clasificarse en tipos asociados a la clase de células que el VIH infecta de manera preferencial, dividiéndose en M-trópicas, T-trópicas

y mixtas. Las cepas M-trópicas, características de África y Asia, muestran afinidad por macrófagos y linfocitos T-CD4 maduros, tienden a alojarse en los tejidos linfoides de las mucosas y aparecen en la etapa asintomática de la enfermedad. Las cepas T-trópicas, características de América y Europa, infectan linfocitos T-CD4 maduros, los cuales se encuentran preferencialmente en el timo y el torrente sanguíneo, son más virulentas que las M-trópicas, inducen la formación de agregados de celulares y se manifiestan en la etapa tardía de la infección en alrededor del 50% de los casos. Ambos tipos conducen al SIDA y se especula acerca de la existencia de dos clases distintas de la enfermedad; las células mixtas, por su parte, infectan a cualquiera de las células mencionadas.

En el nivel molecular, para que ocurra la infección no basta la unión inicial de la proteína gp120 con la molécula CD4; es necesario que ocurra un cambio estructural que permita a la gp120 interactuar con un segundo correceptor, denominado receptor de quimiocinas (figura 2). Este proceso deja al descubierto la proteína gp41, la cual induce la fusión de la membrana viral y celular. Las cepas T-trópicas interactúan de manera selectiva con el correceptor de quimiocinas CXCR4, las cepas M-trópicas lo hacen con el CCR5 y las mixtas interactúan con ambos tipos. Por simplicidad se les denomina cepas X4, R5 y R5X4, aunque algunos autores dudan de que los experimentos permitan discernir entre las cepas R5X4 y mezclas de cepas R5 y X4 en coexistencia.

Se sabe que la correlación anterior está determinada en parte por las interacciones entre una región en forma de lazo de la proteína gp120 con los receptores de quimiocinas ya que los experimentos muestran que es posible alterar el tropismo infeccioso viral mutando ciertos aminoácidos de esta región. Cabe preguntarse si la proteína gp41, que está tan íntimamente ligada a la gp120, no juega un papel complementario en el tropismo infeccioso. Con el propósito de localizar sitios potenciales de interacción de esta proteína con los receptores de quimiocinas, realizamos una búsqueda de posiciones con una alta tasa de mutación, situadas en la región de la proteína externa a la membrana viral (el ectodominio). Para ello efectuamos un análisis de las secuencias de aminoácidos pertenecientes a varios cientos de cepas virales clasificadas según el tipo R5, X4 o R5X4, mediante el algoritmo de información de Shannon para cada una de las posiciones del ectodominio de la gp41:

$$S(k) = - \sum f(b, k) \log_2 f(b, k)$$

Donde $f(b, k)$ es la frecuencia del aminoácido b en la posición k . Nos interesaban en particular las regiones conservadas de baja entropía, interpenetradas por zonas de entropía alta: una región conservada confiere estabilidad estructural y funcional al virus, por lo que la existencia de posiciones intermedias propensas a mutaciones puede tener algún significado evolutivo. En la figura 3 presentamos la distribución de entropías $S(k)$ para las cepas tipo R5, junto con las diferencias de entropía $\Delta S(k)$ respecto de los otros tipos. Los sitios clave son las posiciones hipervariables en las que la diferencia de entropía entre tipos es mayor. En esa figura podemos apreciar que las cepas tipo X4 y R5X4 son menos entrópicas que las R5. De hecho,

un análisis estadístico muestra que los espectros entrópicos de las cepas X4 y R5X4 son significativamente similares entre sí y diferentes del asociado a las cepas R5, lo cual es un indicio de que las cepas mixtas forman una categoría *per se* y no una mezcla de poblaciones R5 y X4 en coexistencia. Si consideramos que las cepas del tipo R5 ocupan un lugar más primitivo en el árbol filogenético del VIH-1 y que son unas diez veces más numerosas que el resto, esto sugeriría que las cepas X4 y R5X4 han encontrado un nicho metaestable dentro del paisaje evolutivo del virus.

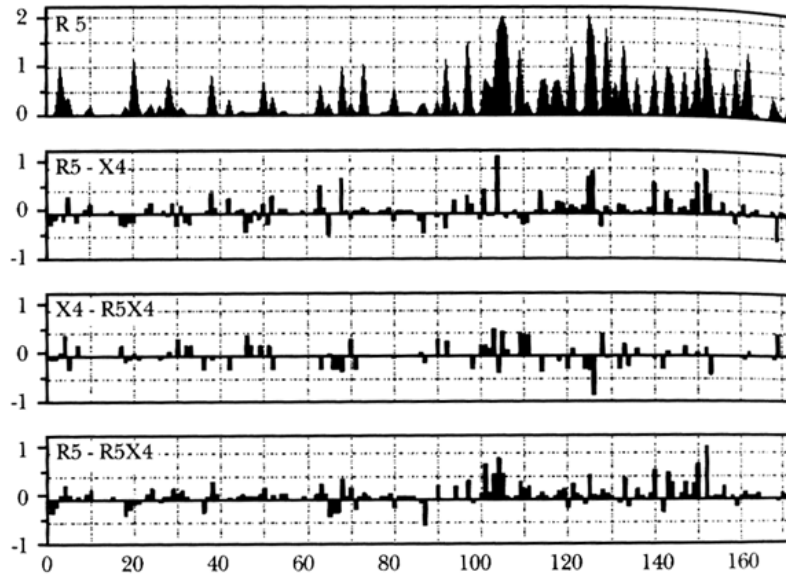


Figura 3: Panel superior: distribución de entropías por posición de aminoácidos del ectodominio de la gp41 para las cepas virales tipo R5. Paneles siguientes: diferencia de entropías por posición entre las distintas cepas.

Localizadas las posiciones clave puede efectuarse un análisis de la frecuencia con que aparecen los diversos aminoácidos, junto con sus propiedades fisicoquímicas, tales como la carga eléctrica y la polaridad o, equivalentemente, su carácter hidrofóbico; éste último se caracteriza por el índice hidropático, el cual es una medida de la solubilidad del aminoácido respectivo en el agua. El análisis estadístico revela que en aquellas posiciones en las que el valor de $\Delta S(k)$ es máximo, aparecen correlaciones entre el índice hidropático (o la carga) y el tropismo infeccioso viral; los aminoácidos localizados en esas regiones tienen una probabilidad muy alta de ser hidrofóbicos en el caso de las cepas X4 y R5X4, mientras que en el de las cepas R5 tienden a ser hidrofílicos. Una tendencia menos manifiesta, pero significativa, se encuentra en la distribución de la carga, donde los aminoácidos suelen ser neutros para X4 y R5X4 y neutros para el tipo R5 (figura 4). Esta variabilidad altera la arquitectura y las interacciones entre la gp41 y sus receptores, las cuales dependen

fuertemente de las fuerzas asociadas con el carácter hidropático. La verificación experimental de este tipo de correlaciones tendría implicaciones terapéuticas importantes, ya que se podrían diseñar tratamientos basados en anticuerpos monoclonales o péptidos sintéticos destinados a bloquear estas interacciones de manera específica.

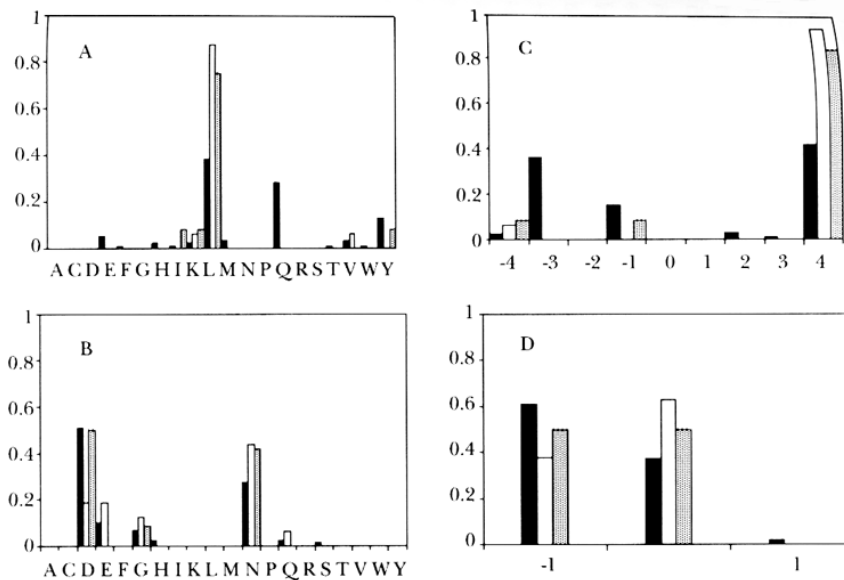


Figura 4: A) y B) distribución de aminoácidos en las posiciones hipervariables 619 y 625 del ectodominio de gp41. Las barras negras, blancas y grises corresponden a las cepas R5, X4 y R5X4, respectivamente. En cada caso, la barra blanca ocupa la posición central. C) Distribución de hidropatía en la posición 619. D) Distribución de carga en la posición 625.

3. LA INFECCIÓN COMO SISTEMA DINÁMICO

La observación de que el número de células T-CD4 en pacientes infectados es muy bajo, inicialmente hizo suponer que el VIH disminuiría la cantidad de estos linfocitos, simplemente infectándolos y aniquilándolos lo que, con el paso del tiempo, provocaría un descenso en la efectividad de la respuesta inmune, dado el papel fundamental que éstos juegan en la actividad inmunológica. No obstante, el proceso resulta ser bastante más complejo por varias razones. Una de ellas es que, aún en etapas avanzadas de la enfermedad, sólo uno de cada mil linfocitos T-CD4 se encuentra infectado por el VIH, proporción demasiado pequeña para explicar la drástica caída del número total de estas células en la sangre. Por otro lado, si se considera la cantidad de virus que es capaz de producir en promedio cada linfocito infectado, la proporción no nos da cuenta del número de virus detectados

en la sangre de pacientes seropositivos ya que, mientras la cantidad total de linfocitos CD4 puede caer a niveles casi indetectables, el número de virus aumenta enormemente.

Este tipo de paradojas de la dinámica de la infección puede estudiarse mediante un modelo matemático que describe la dinámica de las células del sistema inmunológico y del VIH-1 ante terapias basadas en fármacos inhibidores de proteasa (TIP) o de retrotranscriptasa (TIR) o cocteles de ambos tipos de fármacos, como la terapia antirretroviral altamente activa (TARAA). En el modelo suponemos que el VIH reside en tres compartimentos: virus libre en plasma sanguíneo, V_B , con tasa de desaparición o recambio c_B ; virus libre en espacios intersticiales de tejidos linfáticos, tales como los ganglios y los parches de Peyer del intestino, denotado por V_L , y con tasa de recambio c_L ; y virus ligado a las células dendríticas foliculares del tejido linfático, V_F , el cual puede ser retenido por largo tiempo en dichos tejidos sin ser destruido y manteniendo su capacidad infectiva. En el modelo los virus transitan del compartimento i al j , a una razón k_{ij} , con $i, j = B, L, F$. Además, infectan linfocitos T-CD4 y macrófagos del plasma y del tejido linfático, transformándolos en células productoras de virus con tiempos de vida media $t_{1/2}$ claramente diferenciados: los linfocitos T-CD4 productivamente infectados, de vida corta ($t_{1/2} \sim 1$ día), los macrófagos, de vida intermedia ($t_{1/2} \sim 2$ semanas) y los linfocitos T-CD4 de memoria, o crónicamente infectados, de vida larga ($t_{1/2} \sim 6$ meses). Estos últimos no son afectados por la terapia mientras no se activen para producir virus. La tasa de infección respectiva es k_T, k_M y rk_T , con $r < 1$. La concentración de estas células en cada uno de los compartimentos se denota por T_B^*, M_B^*, C_B^* y T_L^*, M_L^*, C_L^* con una rapidez de decaimiento $\delta_B, \mu_B, \gamma_B$ y $\delta_L, \mu_L, \gamma_L$ respectivamente. Es razonable considerar que $\delta_B = \delta_L = \delta_1$, $\mu_B = \mu_L = \delta_2$ y $\gamma_B = \gamma_L = \delta_3$. La dinámica de los linfocitos T-CD4 y los macrófagos del tejido linfático (donde reside la mayor fuente) se describe por medio de las siguientes ecuaciones diferenciales

$$\frac{dT_L^*}{dt} = k_T V_L T_L - \delta_1 T_L^*$$

$$\frac{dM_L^*}{dt} = k_M V_L M_L - \delta_2 M_L^*$$

donde T_L y M_L representan las concentraciones de las células no infectadas. Por otro lado, por ser invisibles a la terapia, es viable suponer que la cantidad de células crónicamente infectadas no cambia: $C_L^* = C_L^*(0)$. La dinámica celular en el plasma se describe por un conjunto de ecuaciones equivalentes, reemplazando $L \rightarrow B$. Cada célula infectada produce un promedio de N_T, N_M o N_C partículas virales durante su tiempo de vida; por lo tanto, podemos expresar las fuentes de producción viral asociadas a linfocitos en la forma $S_B = N_T \delta_1 T_B^* + N_C \delta_3 C_B^*(0)$ y $S_L = N_T \delta_1 T_L^* + N_C \delta_3 C_L^*(0)$, mientras que las fuentes asociadas a macrófagos estarán dadas por $M_B = N_M \delta_2 M_B^*$ y $M_L = N_T \delta_2 M_L^*$. En estos términos, las razones de cambio de las poblaciones virales en los distintos compartimentos son:

$$\frac{dV_B}{dt} = S_B + M_B - (c_B + k_{BL})V_B + k_{LB}V_L$$

$$\frac{dV_L}{dt} = S_L + M_L - (c_L + k_{LB} + k_{LF})V_L + k_{BL}V_B + k_{FL}V_F$$

$$\frac{dV_F}{dt} = -(c_F + k_{FL})V_F + k_{LF}V_L$$

La aplicación de una terapia TIR o TARAA impide la infección de nuevas células y se representa por $k_T = k_M = 0$, suponiendo que sea 100 % efectiva. Por otro lado, la TIP no impide la replicación viral, sino la formación de virus infecciosos. En ese caso, es necesario extender el sistema de ecuaciones para incluir las poblaciones virales en virus infecciosos y no infecciosos. La mayoría de los parámetros involucrados en el modelo pueden ser estimados mediante consideraciones fisiológicas o experimentales que se detallan en las referencias. Las predicciones del modelo para TIP y TARAA, así como la comparación con datos de pacientes, se presentan en las gráficas de las figuras 5 y 6. Para ambas terapias se observa que poco tiempo después de la administración de antivirales, el virus sufre una elevación transitoria, asociada en nuestro modelo a un aumento repentino de la tasa de liberación del virus atrapado en células foliculares dendríticas. Este comportamiento ha sido atribuido anteriormente al retraso en la acción de los fármacos antivirales. Sin embargo, en ese caso debería aparecer una meseta y no una elevación. Posteriormente el virus decae de forma paralela en los tres compartimentos, con cambios de pendiente determinados por los tiempos de supervivencia de las células de vida corta, intermedia y larga. Observamos que el virus no se elimina completamente con la terapia, sino que se mantiene en niveles bajos pero estables, indetectables con la mayoría de las técnicas actuales. En las figuras 5 y 6 se aprecia también que el modelo reproduce de manera bastante cercana la dinámica viral en el plasma de distintos pacientes sujetos a la quimioterapia.

4. SIDA Y GÉNERO

El modelo que hemos planteado es lo suficientemente general para permitirnos visualizar de manera simple otros aspectos de la infección por el VIH independientes de la respuesta a las terapias, como por ejemplo, las diferencias en la enfermedad relacionadas con el género. Con datos de más de 6 mil pacientes proporcionados por el Hospital de Infectología del Centro Médico Nacional "La Raza" del Instituto Mexicano del Seguro Social, desarrollamos un análisis retrospectivo que muestra que en etapas tempranas de la enfermedad, el nivel promedio de virus en el plasma de las mujeres es alrededor de un 50 % más bajo que en los hombres; esta diferencia disminuye con el transcurso de la infección, y se invierte la tendencia en etapas avanzadas cuando la viremia en las mujeres alcanza niveles estratosféricos (fig. 7).

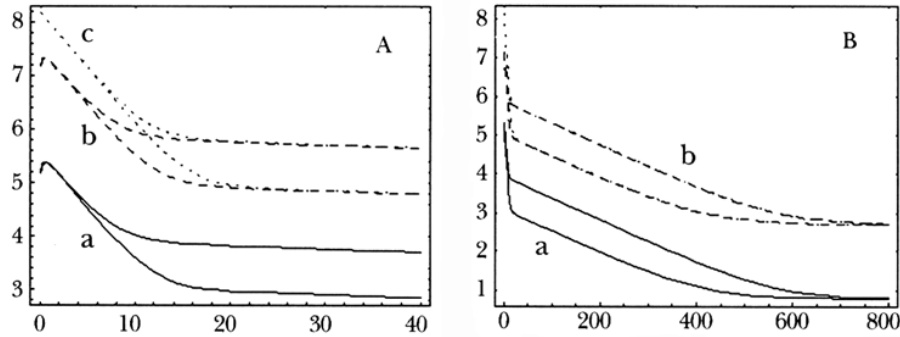


Figura 5: A) Dinámica de la carga viral como función del tiempo hasta 40 días después del inicio de la terapia en a) plasma sanguíneo, b) espacios intersticiales del tejido linfático, c) células foliculares dendríticas. En todos los casos, la curva superior corresponde a TIP y la inferior a TARAA. Nótese que las poblaciones c) convergen a b) en 15 días. B) Lo mismo que A), pero hasta 800 días en a) plasma sanguíneo y b) tejido linfático.

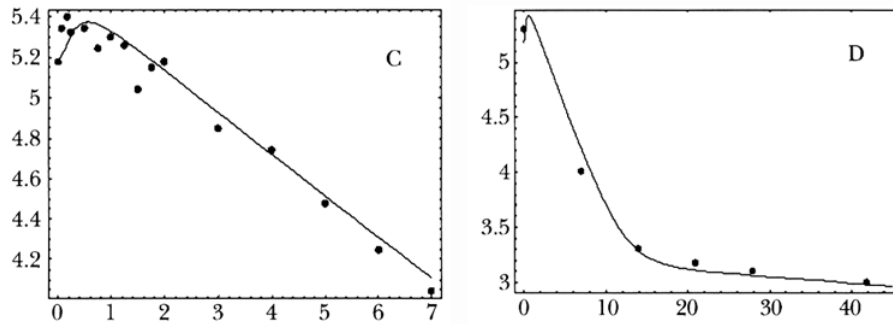


Figura 6: C) Comparación de las predicciones con datos de un paciente sujeto a TIP. D) Comparación de las predicciones con datos de un paciente sujeto a TARAA.

Aunque las diferencias en viremia sólo son estadísticamente significativas para los pacientes en etapas avanzadas, esta tendencia es consistente con muestras tomadas en otras regiones del mundo. Resulta un tanto paradójico que, a pesar de esa disparidad en la dinámica viral en el plasma, ambos géneros progresen igual al SIDA a partir del momento de la infección.

Dado que el avance de la enfermedad correlaciona fuertemente con el estado de las redes foliculares dendríticas, es muy factible que las poblaciones virales en el compartimento linfático sean similares en hombres y en mujeres para tiempos equivalentes de infección. Entonces, en el marco del modelo, las diferencias en viremia se explicarían si las tasas de transferencia entre el tejido linfático y la sangre k_{LB} o las tasas de recambio en sangre c_B , fuesen distintas en hombres y en mujeres. Si denotamos estas poblaciones por V_L^H y V_L^M , entonces $V_L^H \sim V_L^M$ la razón

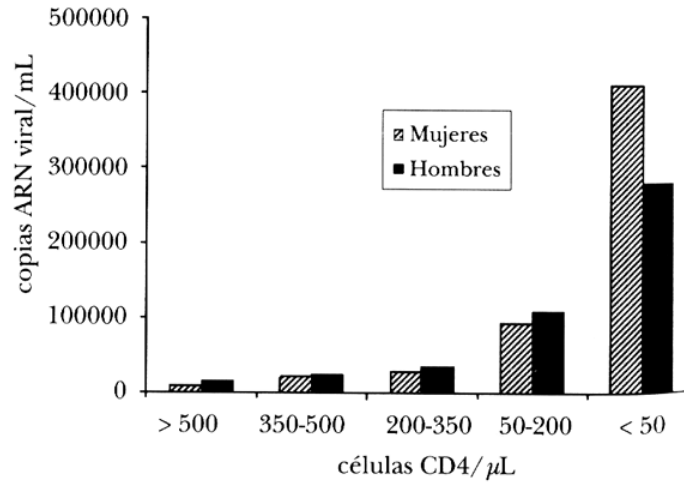


Figura 7: Distribución de cargas virales en el plasma de mujeres y hombres con diferentes cuentas de linfocitos T-CD4.

de cargas virales en el plasma de mujeres y hombres V_B^M / V_B^H , estará dada por el cociente

$$(k_{LB}^M c_B^H) / (k_{LB}^H c_B^M)$$

Por lo tanto, diferencias en estos parámetros alterarán los niveles virales medidos en la sangre. Dichas diferencias podrían atribuirse a la expresión de hormonas en el torrente sanguíneo; existen estudios que muestran que la carga viral en sangre correlaciona con la expresión de hormonas a lo largo del periodo menstrual.

Estos y otros resultados sugieren que para entender la patogenia asociada al VIH, es importante investigar de manera detallada la dinámica viral en los vasos sanguíneos, en particular, la interacción con su capa interna. Trabajos recientes indican que el virus puede quedar secuestrado en el endotelio vascular, dando lugar a vasculopatías provenientes del estrés oxidativo y la respuesta inmune inflamatoria, causados por la presencia crónica del virus. Por otro lado, se sabe que las hormonas femeninas previenen el desarrollo de enfermedades cardiovasculares interfiriendo con las rutas oxidativas e inflamatorias.

El estudio teórico-clínico de las correlaciones entre la infección por el VIH, la expresión hormonal y el funcionamiento del endotelio vascular será, esperamos, nuestra siguiente tarea.

REFERENCIAS

- [1] Epidemiología Nacional y Estadísticas, página web del Censida, <http://www.salud.gob.mx/conasida/datoepi.htm>; Principales aspectos relacionados con la transmisión del virus de inmunodeficiencia humana (VIH) a través de la vía perinatal y su prevención, por I. Villegas, *El Residente*, pp, 8-15, vol. 4 (2006).
- [2] Population Biology of HIV-1 Infection: Viral and CD4+ Demographics and Dynamics in Lymphatic Tissues. *Annual Review of Immunology*, vol.17, pp. 625–656 (1999).
- [3] E. Figueroa, C. Villarreal, L. Huerta, G. Cocho, Prediction of Infectious Tropism Based on Statistical Analysis over Amino Acid Sequences in HIV-1 gp41 glycoprotein, en *Proceedings of the IX Mexican Symposium on Medical Physics*, AIP, (2006).
- [4] G. Cocho, L. Huerta, G. Martínez-Mekler, C. Villarreal, A Multiple Compartment Model for the Evolution of HIV-1 after Highly Active Antiretroviral Therapy, en *Mathematical Approaches for Emerging and Reemerging Infectious Diseases*, pp. 309-323. The IMA Volumes in Mathematics and its Applications, Springer-Verlag, New York (2002).
- [5] P. Ballesteros, J. L. Estrada, G. Barriga, F. Molinar, M. C. Hernández, L. Huerta, G. Cocho, C. Villarreal, Comparative Analysis of Gender Differences in the HIV-1 Infection Dynamics, en *Proceedings of the IX Mexican Symposium on Medical Physics*, AIP, (2006).

⊙ *Esta es una página en blanco.* ⊙

HILOS DE CONTINUIDAD Y CAMBIO: NUEVOS PUENTES Y VIEJAS CARGAS*

Han transcurrido cuarenta años desde la fundación del Programa de Ciencia y Sociedad (PCyS) de la Facultad de Ciencias (FC), de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), y en este trabajo se presentan algunas remembranzas sobre el origen y evolución de dicho programa, así como algunos comentarios sobre los proyectos que creemos son la continuación actual del mismo. También se presentan algunas líneas de discusión que parece cobrarán relevancia en el porvenir.

PERMANENCIA CAMBIANTE

Como muchas otras actividades, el origen del PCyS estuvo asociado a las inquietudes que precedieron los eventos de 1968 y a lo que sucedió ese año. Eran tiempos en que se organizaban multitud de círculos de estudio, donde se discutían las contradicciones políticas y económicas que tenían lugar en México y en el mundo. Tienen lugar los “movimientos del 68” en Francia, México, Checoslovaquia y otros países, y en nuestro caso la represión sangrienta de Tlatelolco. Sin embargo, mucha gente consideró que sólo había sido una batalla perdida y que en el caso de la UNAM se tenían que promover actividades académicas y de organización que pudieran ayudar al tránsito a una sociedad más justa que la de ese momento. Como parte de estas inquietudes, algunos profesores y estudiantes de la FC organizaron discusiones colectivas sobre las formas de hacer ciencia bajo el capitalismo, así como los modos de producción respectivos, donde no sólo se partía de un análisis crítico de la organización del trabajo científico en las formaciones sociales capitalistas, sino que se planteaban medidas para cambiar el contenido de los cursos y estructurar proyectos de investigación que fuesen coherentes con una sociedad igualitaria, aquella donde se minimizarían las diferencias de nivel de vida y de poder de decisión, a la par de elevar sistemáticamente la calidad de vida; en otras palabras, se trataba de poner en práctica lo que podría llamarse un enfoque progresista de izquierda de la ciencia. En las discusiones no sólo se exploraron aspectos del marxismo sino que se discutieron algunos de los planteamientos de pensadores “organicistas” como Aristóteles y su explicación del cambio a partir de

* Ensayo escrito por Germinal Cocho Gil y Eduardo Vizcaya Xilotl. Publicado en: Guerrero, F., Valadez, O. y Vizcaya, E. (eds.), 2016. *Naturaleza, Ciencia y Sociedad: 40 años de pensamiento crítico interdisciplinario en la Facultad de Ciencias*, UNAM. México, CDMX: CopIt-arXives y Facultad de Ciencias, UNAM.

cuatro causas, la epistemología genética de Piaget y el psicoanálisis de Freud, analizando en cada caso las similitudes y diferencias con el materialismo dialéctico, al que considerábamos una de nuestras guías, pues en él se pone énfasis tanto en la dinámica de los diversos niveles de organización de la materia como en los cambios cualitativos y cuantitativos, incluyendo las dinámicas que surgen en las zonas de conflicto donde “compiten” factores contradictorios, lo que vale decir, guarda una gran similitud con la dinámica de los sistemas complejos en zona crítica.

En paralelo con dichas discusiones, Manuel Pérez Rocha tenía un seminario de ciencia y sociedad, y reuniendo ambos esfuerzos propusimos la formación del Programa de Ciencia y Sociedad, coherente con las inquietudes que tenían lugar en profesores y estudiantes de la facultad, incluyendo al personal directivo. Inicialmente participaron Flavio Cocho y Marco Antonio Martínez Negrete, profesores de tiempo completo de la Facultad de Ciencias, Germinal Cocho, del Instituto de Física, y Luis Fueyo, estudiante asociado al Instituto de Astronomía. Posteriormente se incorpora Rosalío Wences, doctor en sociología, asociándolo al Departamento de Física, y Francisco Cepeda, matemático, que había sido coordinador del Colegio de Ciencias y Humanidades (CCH) Oriente.¹

Durante el proceso de edición de su *Metapocatástasis de civilización*, en 2005, Flavio elaboró una “Autosemblanza” que acompañaría dicha obra, y aunque finalmente no fue incluida, en ella hace un recorrido biográfico e histórico muy interesante. Con referencia al PCys y su funcionamiento señala:

¿Cuál era la idea básica? La concepción de que la ciencia es una actividad humana enmarcada en la sociedad, de la que depende y a la que modifica para bien o para mal; no hay *ciencia en sí* sin científicos encuadrados e influidos *a fortiori* por la sociedad. Había en consecuencia que realizar investigación científica, sí, pero estudiando además su relación e interdependencia con todo lo social, buscar alternativas que incidieran en el cambio social anticapitalista, programar cursos académicos con la óptica anterior para ir formando en los estudiantes una conciencia social progresista e, incluso, participar políticamente en las luchas sociales concretas que fuera necesario e involucrar a la Facultad de Ciencias. Logramos que el Programa de Ciencia y Sociedad fuera reconocido institucionalmente a nivel académico.

De tal suerte que aunque gran parte de las actividades del programa tenían que ver con la epistemología de la ciencia y con el análisis crítico de la organización del trabajo científico en las formaciones sociales capitalistas, enfatizábamos que esto no debía ser sólo un apéndice histórico en los cursos, sino que debíamos modificar aspectos básicos del contenido de los mismos. Esto se hizo en cursos de la carrera de Física como Calor, Ondas y Fluidos (COF) y en el de Física Moderna II; en este último se lograron establecer relaciones coherentes entre la dinámica social a lo largo de la historia y lo contemporáneo, incluyendo la problemática científica

¹ Un trabajo que aborda con profundidad la historia de la FC, ahí incluida la del PCys, del mismo Francisco Cepeda, es su tesis de Maestría en Historia, que tiempo después se convertiría en *El Prometeo en México. Raíces sociales y desarrollo de la Facultad de Ciencias, unam*. Dicha obra se puede descargar del sitio del Centro de Investigación en Matemáticas Aplicadas, de la Universidad Autónoma de Coahuila: www.cima.uadec.mx/index.php/publicaciones

de frontera. A nivel de posgrado, dentro del doctorado de física, se organizó el paquete de cursos: “Dinámica de sistemas complejos abiertos físicos, biológicos y sociales”.

Con el paso del tiempo algunos elementos del PCys se van a otras instituciones: Francisco Cepeda se va a Saltillo, donde organiza la primera escuela y luego Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas de la Universidad Autónoma de Coahuila; y Luis Fueyo se va a Sinaloa, etc. Aparecen algunas contradicciones en la FC, y el Programa de Ciencia y Sociedad decae, no sin dejar algunas de sus huellas en otros espacios académicos, con maneras y modalidades distintas, como el Grupo de Biomatemáticas (también de la FC) (Martínez-Mekler, 2000), y contribuyendo, en 1985, a la creación del Departamento de Sistemas Complejos en el Instituto de Física (IF-UNAM), años antes de que aparecieran centros como el Instituto Santa Fe, en Estados Unidos, o instituciones similares en países de Europa, lo que se explica a partir de ese elemento: pensar en las similitudes del materialismo dialéctico y la dinámica de los sistemas complejos.

A partir de 2011 tiene lugar una serie de confluencias que se deben en parte a las improntas del PCys. Partiendo de una identificación temática, y con la intención de recuperar historias, tejer lazos fraternos y generar nuevos retos colectivos, a nivel docente se establece una articulación orgánica entre dos cursos que se imparten en la Facultad de Ciencias: “Naturaleza y Sociedad” y “Seminario de Ciencia y Sociedad I” (o II, según el semestre), y se constituye la Coordinación “Naturaleza, Ciencia y Sociedad” (cNCys).

Impulsando dinámicas académicas polimorfas, la cNCys logra convocar a la dirección de la Facultad de Ciencias (a través de la Secretaría de Comunicación) y a *Ludus vitalis: revista de filosofía de las ciencias de la vida*, para conmemorar los 50 años de la publicación de la obra *The Structure of Scientific Revolutions*. Así, los días 4, 5 y 6 de diciembre de 2012 tiene lugar el coloquio “Revoluciones científicas y crisis sociales. A medio siglo de *La estructura*, de T. S. Kuhn”.

Los objetivos que se plantearon fueron: 1. Fomentar el acercamiento entre estudiantes, profesores e investigadores en torno a la reflexión sobre el cambio y la crisis social, así como el papel que juega o puede jugar la ciencia en ese contexto. 2. Incentivar el análisis y reflexión sobre los impactos de la obra kuhniana. 3. Explorar las tendencias actuales de la ciencia contemporánea.

Dividido el coloquio en 6 mesas temáticas, la sesión inaugural: “Transiciones sociales y las ciencias en México”, contó con la participación de Rosaura Ruiz, Pablo González Casanova, Manuel Peimbert, Ruy Pérez Tamayo y Germinal Cocho. Las otras 5 mesas, en orden consecutivo, llevaron por títulos: “Fronteras de la física: ¿Hay una revolución científica en puertas?”; “Kuhn y las revoluciones científicas”; “Evolución y revolución en la biología contemporánea”; “Problemas sociales y retos de la medicina actual”; Clausura: “La ciencia y el cambio social en México”. En total se contó con la participación de 24 profesores e investigadores provenientes de una decena de dependencias de la UNAM, y otros tantos provenientes de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM), Universidad Autónoma Metropolitana-Cuajimalpa (UAM-C), Secretaría de Salud (SSA) y

del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav-IPN). Con respecto a los asistentes, vale decir que se entregó más de medio centenar de constancias.

En el terreno editorial, y contribuyendo al movimiento Open Access, a inicios de 2014 fue liberado el libro electrónico *Ciencia y Sociedad: Pinceladas*, publicado bajo el sello de CopIt-arXives, presentándose el 5 de marzo de 2014 en la FC. Sumando esfuerzos de matices diversos, y como una muestra de sus propias trayectorias en el impulso y desarrollo de la responsabilidad social de sus áreas de trabajo, si bien no limitados a ello, la presentación corrió a cargo de Mariana Benítez Keinrad, del Instituto de Ecología; Ana María Cetto, del Instituto de Física, y José Sanmartín Esplugues, de la Universidad de Valencia, España; cabe mencionar que en ese evento se contó con la participación del editor en jefe de CopIt, Octavio Miramontes Vidal, quien expuso los objetivos y logros del proyecto hasta entonces.

En el momento actual México está lleno de contradicciones. Por muchos lados se percibe un ambiente inquieto; la existencia de movimientos progresistas, de resistencia y de reivindicaciones heterogéneas es un indicador de ello, y tienen su reflejo en las universidades, en formas, espacios y tiempos muy específicos. Estamos convencidos de que la FC tiene que seguir contribuyendo al análisis del papel de la ciencia en la sociedad. Por ello se ha organizado el Programa de Ciencia y Humanismo en que se realizarán labores de investigación, docencia y difusión sobre el papel de las ciencias, artes y humanidades en una sociedad futura más justa que la actual. Como en el caso del “viejo” Programa de Ciencia y Sociedad, contribuirá personal de carrera y de asignatura de la facultad, poniendo énfasis en la colaboración con otras instituciones dentro y fuera de la UNAM.

CAMBIO PERMANENTE

[...] la esencia de la creatividad es una predisposición a hacer el loco, a jugar con el absurdo, para someter más tarde el chorro de ideas a un severo juicio crítico. La aplicación de la imaginación al futuro requiere, pues, un medio en el que esté permitido equivocarse, en el que la novedosa yuxtaposición de ideas pueda expresarse libremente, antes de ser cribada por la crítica. Necesitamos santuarios de imaginación social.

Alvin Toffler, El shock del futuro.

De acuerdo con Aristóteles todo cambio en la naturaleza tiene cuatro causas: material, formal, eficiente y final. Y constituyen los únicos tipos de respuesta que pueden darse cuando se pide una explicación del cambio. Un ejemplo clásico lo constituye una estatua. La causa material de su existencia es el mármol de que está hecha; su causa formal es la forma idealizada del objeto terminado, presente en la mente del escultor desde antes de su realización; los golpes con el cincel y el martillo sobre el mármol son su causa eficiente, el instrumento con que está hecha; y la causa final es la que tendría como finalidad o propósito: embellecer el sitio donde será colocada.

Durante 1971 el estudio de distintos aspectos de la causalidad reunió en el Centro Internacional de Epistemología Genética, con sede en Ginebra, a Jean Piaget, Thomas S. Kuhn, Mario Bunge, Leon Rosenfeld y Francis Halbwachs, y cuyo libro *Les Théories de la causalité* da cuenta de las discusiones que tuvieron lugar.² Es en esa reunión donde Kuhn (1982, pp.46-55) presentaría: “Los conceptos de causa en el desarrollo de la física”, mostrando algunas convergencias entre su trabajo de historiador de la ciencia y los estudios psicológicos de Piaget. Para empezar, señala que el concepto de causa tiene dos sentidos, uno estrecho y otro amplio. El sentido estrecho se parece mucho al concepto aristotélico de causa eficiente, y también al que expresan los estudios de Piaget: la noción de causa en los niños proviene de un agente activo que jala o empuja, manifiesta un poder o ejerce una fuerza. El sentido amplio de causa tendría que ver más bien con la noción general de explicación, pues implica establecer en cada caso y para cada acontecimiento por qué ocurrió. En otras palabras, una explicación de carácter causal (en sentido estrecho) proporciona siempre un agente y un paciente: una causa y un efecto subsiguiente; en el sentido amplio, se tienen explicaciones en las cuales no se presenta como *la causa* ningún agente activo, ni tampoco un acontecimiento o fenómeno anterior.

Kuhn señala que el sentido estrecho de causa se vuelve predominante en física durante el siglo XVII, con explicaciones mecánicas basadas en choques, tracciones y empujones; pero desde entonces dichas causas eficientes van jugando un papel decreciente hasta reducir su aplicación al campo de las anomalías. A la par y de forma creciente, se van aceptando distintas causas formales como explicación del orden de la naturaleza: Con Newton y la gravitación aparece una explicación no mecánica (la acción a distancia) que representa el embrión del concepto de campo, mismo que se ve fortalecido posteriormente con los desarrollos en electricidad, magnetismo y en el estudio del calor. Cuando se aceptan las ecuaciones de Maxwell para el campo electromagnético se tienen ya explicaciones en el sentido amplio, pues corresponden a una “entidad física no mecánica y fundamental, con propiedades formales que sólo pueden describirse por medio de ecuaciones matemáticas” (Kuhn, 1982, p.52). Durante el siglo XX se incorporaron elementos probabilísticos fundados en el principio de incertidumbre de Heisenberg (interpretado como un indeterminismo inerradicable en la versión ortodoxa), y también se incrementaron las explicaciones físicas basadas en campos, así como las propiedades formales de la materia (spin, paridad, extrañeza, etc.), describibles únicamente en términos matemáticos.

Un cuadro parecido nos lo proporciona Richard Feynman, quien al señalar las formas equivalentes de la mecánica clásica, compara tres formulaciones: la de Newton (en términos de fuerzas), la formulada con un potencial o campo local, y la que se plantea a través de un principio variacional (el principio de mínima acción), y se pregunta:

² Avances posteriores se darían como producto de la colaboración de J. Piaget y R. García, y se reunirían en *Les explications causales*, correspondiente a los *Études d'épistémologie génétique*, 26 (1971), según hace constar el sitio web de la Fundación Jean Piaget: www.fondationjeanpiaget.ch

¿Cuál de estas interpretaciones es la correcta? Si estas distintas alternativas no fueran exactamente equivalentes desde un punto de vista matemático, es decir si dieran lugar a consecuencias diferentes entre sí, lo que habría que hacer sería buscar experimentalmente de qué forma la naturaleza realmente se comporta. [...] Es imposible escoger entre ellas [...] Pero psicológicamente son muy distintas de dos maneras distintas. Primero, desde un punto de vista filosófico unas te gustan más que otras; y sólo a base de mucho entrenamiento es posible vencer esta enfermedad. Segundo, desde un punto de vista psicológico son distintas porque pierden totalmente su equivalencia cuando se trata de imaginar nuevas leyes. (Feynman, 1983, pp.40-41)

Asociando estos últimos comentarios con los planteamientos de las causas aristotélicas, se puede decir que la formulación newtoniana emplea una causa eficiente, la del campo local una causa formal y la de principios variacionales una causa final. Por otro lado, tenemos también a los principios de conservación, que están relacionados con propiedades de simetría espacio-temporal –otra causa formal–. En mecánica clásica no hay inconveniente en resolver un problema dentro de una formulación o la otra, porque a fin de cuentas se tienen demostraciones matemáticas de las equivalencias entre ellas. Así, se aceptan las formulaciones variacionales, que tienen un sentido teleológico, porque se puede demostrar que existe una expresión equivalente en términos locales, y que constituyen el sentido estrecho de causa (que corresponde a lo que usualmente se entiende como causal).

En el caso de la mecánica cuántica también hay formulaciones distintas que podrían interpretarse como en el caso anterior: las expresadas matemáticamente a través de operadores y la formulación variacional en términos de integrales de trayectoria. Aunque formalmente equivalentes, todas ellas conservan un cierto indeterminismo, y las interpretaciones alternativas, desde el inicio mismo de la teoría cuántica, han dado lugar a profundas reflexiones filosóficas acerca del carácter epistemológico y ontológico de los fenómenos cuánticos. Motivados por la construcción de una interpretación que salve los aspectos aparentemente inexplicables del comportamiento azaroso irreductible y acausal del mundo cuántico, y que también toma en cuenta los resultados de los análisis históricos que señalan el apriorismo y las preconcepciones filosóficas de la versión ortodoxa, se tienen formulaciones estocásticas que argumentan lo siguiente:

En la teoría cuántica se sabe que el espacio está permeado por una diversidad de campos de vacío, que no son sino el estado fluctuante y azaroso de mínima energía de los diversos campos que se dan en la naturaleza. A su vez, estos campos de vacío son “azarosos” por obra y gracia de la (prácticamente) infinidad de fuentes que contribuyen a ellos en cada instante (es decir, las partículas del universo). El espacio vacío es así en realidad un pleno, enormemente rico en fenómenos físicos. Estos campos de vacío, por encontrarse en la condición de mínima energía son, ellos sí, irreductibles. Su existencia es el resultado del hecho fundamental de que ningún sistema cuántico puede encontrarse en un estado totalmente libre de movimientos y cambios. (De la Peña, 1999, p.47)

Como se puede ver, esos aspectos filosóficos y psicológicos a que hacía referencia Feynman tienen implicaciones en la creación de teorías alternativas, tanto en los

terrenos ontológicos como en los aspectos epistémicos y metodológicos. Y desde luego no se limitan meramente a los contenidos de una cierta disciplina, en este caso la física cuántica, porque a su vez se pueden también plantear interrogantes sobre la matematización de todas las teorías físicas y sobre una posible evolución histórica distinta. Por ejemplo, en el caso de la física clásica, podríamos llegar a

concebir que si nuestros conocimientos físicos hubieran comenzado sobre el terreno biofísico, en lugar de los dominios inorgánicos, hubiéramos quizá llegado a otra física subordinada desde el inicio a la noción de campo o de estructuras disipativas en el sentido de Prigogine; o que otra matemática hubiera sido posible si los griegos hubieran partido de postulados no euclidianos o no arquimédicos. Por el contrario, si se cuestionan estas suposiciones, y se atribuye al espíritu humano una sola física y una sola matemática posible, esto nos conduciría a la hipótesis de la predeterminación de los conocimientos. Parecería, pues, que estamos en presencia de una alternativa ineluctable: o una diversidad heterogénea de caminos y de resultados posibles, o la preformación del saber. (Piaget, 1982, p.22)

El asunto es que estas reflexiones coinciden con la necesidad de repensar lo que estamos haciendo en cada momento y sus implicaciones, y es algo que se inscribe en un cuadro más general:

El impulso de los físicos a entender y explicar la naturaleza es una condición esencial de su trabajo. Los cánones de explicación aceptados sirven para indicarles qué problemas no se han resuelto todavía, qué fenómenos permanecen sin explicación [...] condicionan en parte las clases de soluciones a las cuales será capaz de llegar. No es posible entender la ciencia de un periodo determinado, sin haberse adentrado en los cánones de explicación aceptados por los científicos de tal época. (Kuhn, 1982, pp.54-55)

En el momento actual se habla mucho de sistemas complejos, emergencia, complejidad, sistemas emergentes, así como de las tendencias y fronteras a trasgredir; asimismo, se plantean como parte de los retos abiertos para este siglo (Miramontes, 2013) y, por lo que hemos dicho, es posible que los cánones de explicación se pondrán en perspectiva y se redefinirán, ahí incluidas varias de las críticas al determinismo, al mecanicismo y al reduccionismo, profundizadas a partir de la teoría del caos, de la teoría general de sistemas, etc. y sin caer en los excesos de los holismos del pasado.

Los sistemas complejos están constituidos por elementos, dinámicas e interacciones heterogéneas. Debido a esta heterogeneidad y a las leyes de los grandes números muestran, por un lado, aspectos genéricos (leyes de potencias, redes de mundo pequeño, etc.) y, por otro, exhiben características específicas, muestran comportamientos tozudamente individuales.

Se ha encontrado que los sistemas complejos robustos y adaptables están en la zona crítica en que basta un cambio pequeño de la señal reguladora para un cambio grande cuantitativo o cualitativo en el sistema; y también se tiene que las leyes genéricas que exhiben son válidas para sistemas de distinta naturaleza, ya sean sistemas físicos, biológicos o sociales.

Los organismos vivos en sus diferentes niveles están cerca del punto crítico, y como son considerados un paradigma para los sistemas complejos, se pueden ver de forma ubicua estos aspectos genéricos/específicos que señalamos, análogos a los fenómenos críticos en física. Por un lado, los organismos vivos tienen una diversidad enorme, y por otro comparten aspectos generales como la llamada molécula de la vida, el DNA; en la búsqueda de mayor generalidad, en las discusiones de astrobiología se cita como “vida basada en carbono” y sería una forma muy específica (Miramontes, 2013). En el caso de los sistemas sociales vemos que “cada cabeza es un mundo”, pero que lo que sucede en una manifestación de protesta colectiva es predecible, por no decir los hábitos de compra, transporte, alimentación o las búsquedas de información por Internet.

Una discusión preliminar sobre el análisis cuatripartito de las causas aristotélicas arroja las siguientes consideraciones: Las causas formal y eficiente son retrógradas (el presente depende del pasado) y la causa final es anterógrada (el presente depende del futuro). En el caso de la causa eficiente lo que sucede en un instante condiciona de modo concreto y restringido lo que sucede inmediatamente después, de modo que se puede decir que es una causa “dictatorial” en que todo lo que no está permitido está prohibido. En la causa formal se tienen restricciones geométricas o de otro tipo que delimitan lo que puede suceder. Podríamos decir que la causa formal es una causa “democrática”, en que todo lo no prohibido está permitido.

Consideradas como causas finales, las formulaciones variacionales –en física– son equivalentes a principios de invariancia, que son causas formales. Y como los principios de invariancia implican que la restricción es válida de principio a fin (un proceso que conserva la energía lo hará al principio, al medio y al final), se tiene una especie de “transmutación” entre la causa final y la formal. Esto último se ha considerado muchas veces como un defecto, habiéndosele colocado a Aristóteles como un teleologista; pero dadas estas relaciones entre las causas formal y la final, también se le puede considerar más bien como un “formalista”. Razonando por analogía, unas causas formales corresponden a principios de invariancia explícitos (como en física) y corresponderían a otros difíciles de explicitar, como es el caso de lo característico de un organismo vivo, como un conejo. Esto último podría tener relevancia en las discusiones biológicas sobre evo-devo, pues los planteamientos que priorizan las restricciones físico-químicas confrontan tanto al teleonomismo (o teleologismo biológico) como al seleccionismo que apela a lo azaroso, y que dejan fuera muchos aspectos importantes; cabría la posibilidad de tener formulaciones equivalentes entre lo final/formal como en la física.

Todas estas consideraciones habrá que ir las articulando alrededor de las discusiones más generales sobre las leyes naturales, puesto que algunos autores piensan que *todas* las leyes físicas son emergentes:

El conflicto lógico entre una frontera abierta y un conjunto de leyes generales se resuelve con el fenómeno de la emergencia. Lamentablemente, el término “emergencia” ha adquirido una variedad de significados, entre los que se incluye el de fenómenos sobrenaturales que no están gobernados por las leyes de

la física. No uso la palabra en ese sentido, sino que me refiero a un principio físico de organización [...] La naturaleza está llena de fenómenos muy confiables que constituyen versiones primitivas de cuadros impresionistas. Un paisaje florido pintado por Renoir o Monet nos llama la atención porque se ve como un todo perfecto cuando, en realidad, las pinceladas de las que está hecho son imperfectas y de formas azarosas. Como las pinceladas son en sí imperfectas, la esencia del cuadro está en su organización. (Laughlin, 2007, pp.29-30)

Y esto nos remite, además, a la aparición de regularidades en un nivel, cuando en un subnivel se dan fenómenos azarosos, como esas pinceladas; corresponden a las que se llaman leyes de grandes números. Dos frases que capturan la esencia de este enfoque son las debidas a la mancuerna Kolmogorov-Gnedenko. La primera, que aparece al inicio del prefacio de su obra concerniente a las distribuciones límite resultantes de la suma de variables aleatorias, afirma categóricamente que: “De hecho, todo el valor epistemológico de la teoría de la probabilidad se basa en que fenómenos azarosos presentes a grandes escalas crean en su comportamiento colectivo una estricta regularidad no azarosa” (Gnedenko, 1954, p.1)

Y la segunda, que aparece en el prefacio de *The Theory of Probability*, y que afirma:

When we say that the apparatus of probability theory is best suited to the study of molecular phenomena, we do not in the least wish to say that the philosophical premises for applying the theory of probability in natural science spring from the insufficiency of our knowledge. The basic principle lies in the fact that when studying mass-scale phenomena, a set of *new and peculiar regularities* come to light. When studying phenomena caused by the action of large numbers of molecules, it is not necessary to take into consideration all the properties of every molecule. (Gnedenko, 1969, p.10)

Esto último conecta inmediatamente con los fenómenos sociales, pues como decíamos anteriormente, a nivel individual se puede pensar que nuestras decisiones y acciones son aleatorias, pero cuando se ven en su conjunto, aparecen regularidades colectivas de varios tipos (Martínez-Mekler, 2011), e implican ver qué propiedades son importantes en la descripción y cuáles son hechas a un lado.

En cuanto a los aspectos sociales y la causalidad, se puede decir que existen varios terrenos donde se encuentran y se conjugan. En el terreno de la acción sociopolítica se habla de “pelear por una causa legítima”, “trabajar por una causa justa”, etc., implicando una cierta acepción de las causas que venimos discutiendo, en este caso de una causa final: un propósito o un objetivo. “Sumarse a una causa” vendría a significar que se ha detonado un proceso de motivación en los actores políticos, de tal suerte que han decidido generar acciones coherentes con dicha causa. Otra vez hay una especie de “mezcla” entre la causa final y la formal, porque de algún modo la idea de lo que se quiere alcanzar (un ideal) también es una *forma* que tiene existencia en la mente del sujeto que está actuando. A su vez, dicho sujeto o actor puede ser considerado como una causa eficiente del proceso histórico; sus acciones se sumarán a las de otros actores para configurar la resultante colectiva de

los fenómenos sociales humanos, y para realizar dichas acciones jugarán un papel importante sus instrumentos o herramientas (ya sean cognitivos, conceptuales, tecnológicos, narrativos, estéticos, etc.). Las narrativas históricas cuentan las maneras en que distintas acciones se van articulando a lo largo del tiempo y de la geografía, y muchas veces resaltan las actuaciones de sólo un pequeño grupo de actores, los que clásicamente se conocen como héroes y villanos. Pero si uno quiere construir una manera distinta de contar (y hacer) la historia, quizás pueda elaborarse a partir de estas analogías con los grandes números y de observar distintos planos de intervención. Desde luego, esto último tiene que ver con las organizaciones humanas, pues ahí se definen ciertos objetivos y medios para alcanzarlos. En este punto se tienen ciertos traslapes con los modos maquiavélicos de ejercer el poder (esos que afirman que el fin justifica los medios), porque aparece nuevamente esa especie de teleología moderada o mezclada con lo formal, y que además se relaciona con la causa eficiente, al constituir dilemas, pues se quieren *explicar* o justificar las acciones de los sujetos a partir de sus fines, propósitos u objetivos, y los dilemas de comportamiento aparecen asociados con aquellos aspectos instrumentales tan cuestionados desde los terrenos de la ética política.

Por supuesto que lo aquí planteado deberá *hibridarse* con los resultados provenientes de las ciencias sociales y de las humanidades, pues representa una versión condensada de muchas otras reflexiones sobre la política. Y esto es tremendamente importante porque:

Hoy el mundo vive bajo el dominio de un *capitalismo complejo* y en una situación lamentable de separación y desarticulación teórica-práctica entre quienes dominan la complejidad e ignoran y ningunean el análisis crítico marxista y quienes dominan el pensamiento crítico y sólo excepcionalmente profundizan en los problemas teórico-prácticos de la complejidad y en su redefinición de la lucha de clases y de liberación, y de los obstáculos en la construcción de un mundo alternativo. (González Casanova, 2004, p.73)

Así pues, aún bajo el dominio de ese capitalismo salvaje que denominan neoliberalismo, conviene recordar tres aspectos estructurales del capitalismo (para ligarlos a los estudios de complejidad):

- a) la contradicción entre la propiedad privada de los medios de producción y el carácter social de las relaciones de producción;
- b) la contradicción entre la necesidad de restringir al máximo la libertad en el proceso de trabajo (con la intención de poder controlarlo más fácilmente) y la necesidad de libertad para que la labor de los subordinados sea creativa, y
- c) el que con el avance de las tecnociencias existen las condiciones para que los humanos sean muy creativos individual y socialmente y que, sin embargo, en promedio la gente es cada vez más ignorante y menos creativa.

Si nos consideramos inmersos en el mundo descrito anteriormente, un mundo de cambio rápido, y si además queremos contribuir con algunas ideas y acciones

al tránsito a una sociedad más justa, coherente con el humanismo creativo (Cocho, 2013), resulta fundamental profundizar en la teorización sobre la política organizativa, aquella que se refiere al conocimiento de los diversos modos de organización, de sus ventajas y desventajas, puesto que en la época actual podemos decir que “las relaciones de producción se vuelven las principales fuerzas productivas”. En este sentido, juegan un papel relevante los resultados que se han ido acumulando en torno a las redes complejas, tanto las biológicas como las sociales, pues hay aspectos dinámicos y estructurales que importan para la cohesividad, la comunicación, la robustez y la tolerancia a fallas de las organizaciones que se quieran impulsar. Por otro lado, se plantea como un reto a superar la manera de incorporar e interactuar con los saberes cotidianos, los del sentido común.

En el aspecto práctico, esto de la política organizativa se puede plantear como un asunto de articulación entre lo genérico (universal) y lo específico (individual), abordando lo que se quiere, lo que se tiene a la mano, el historial logrado, etc. y que contemple la evolución de la cooperación en sus vertientes técnicas, y los resultados biológicos alrededor sobre la empatía en otras especies animales, dialogando con las categorías de la solidaridad humana, la caridad religiosa y la filantropía ciudadana.

Dicho en otras palabras, habría que encarar la tensión creativa entre lo social/individual, para responder a la dicotomía aparente o a la contradicción evidente entre ambas. Esto nos ha de llevar al reto de sintetizar las éticas, tanto las que implican derechos como las que otorgan deberes (Cocho, 2013). Por ello, habría que impulsar una especie de *heurística organizativa* para explorar distintos aspectos prácticos que se tendrán que desprender/confrontar de/con las teorizaciones: los aspectos que funcionen habrá que potenciarlos y los que no, descartarlos, y en simultáneo buscar explicaciones de ambos.

Resumiendo, se puede decir que desde hace algún tiempo nos encontramos en medio de una crisis de proporciones planetarias, una crisis de civilización. Las características de esta crisis se pueden expresar a partir de los efectos observables en varias escalas, aspectos que revisten un alta preocupación social: energía, salud, educación, ambiente, etc.; efectos que provienen en buena medida del uso de la *tecnociencia* ligada al gran capital tales como la propagación de los cultivos transgénicos, los desechos tóxicos industriales y nucleares, los derechos humanos violentados a través de las tecnologías de la comunicación y la información, etc., y otros cuyas causas hay que dilucidar, como las enfermedades complejas y la seguridad social en un sentido amplio (que incluiría tanto a la educación como a la salud y la recreación).

Señalar, denunciar y criticar los efectos perniciosos es parte de la labor crítica, pero la formación académica que brindan las ciencias naturales también ha de contribuir a la búsqueda de soluciones y la eliminación de los mismos, sin renunciar ni relegar la capacidad creativa de los científicos ni sus responsabilidades sociales. Lo que demanda *necesariamente* la construcción y proliferación de puentes de distintas características. Puentes entre ciencias y humanidades. Puentes entre el sentido común y las ciencias de la complejidad. Constructores de puentes con funciona-

miento de enzimas. Puentes como objetivo, como causa de la causa (eficiente), la que lleva a los artífices/actores a pulir/manejar sus herramientas para aplicarlas y entrelazarlas con la materialidad (humana/nuestra), y con el *blueprint* mental que sugiere la metapocatástasis civilizatoria (Cocho, 2005). Puentes que se inspiran, y aspiran, a los que se construyen en la región de Meghalaya, India, donde:

El agua y los ríos que alimentan las plantas ha hecho crecer árboles frondosos en sus márgenes, con potentes raíces. Estos cimientos naturales, fuertes y profundos, porque de otro modo los árboles hubieran sido arrastrados por la corriente, ofrecieron los hilos de unos puentes maravillosos, que el pueblo tejó a lo largo de incontables generaciones. Entrelazando las raíces de los árboles de un lado con las del otro, formaron una urdimbre flexible, fuerte y viva, que se conectaba sobre el río en varios pisos y con direcciones diversas y combinadas. Los abuelos enseñaban a los niños que deberían continuar el trabajo si éstos fallecían, orientando las raíces por medio de guías de corteza que las llevaban poco a poco a enraizarse en la margen opuesta del río, de manera que el puente en realidad no puede ser destruido porque se revitaliza y se fortalece cuando el río crece.

Si el río crece más de lo que ese puente soporta, siempre habrá otro más alto que pueda entrar en uso hasta que el río reduzca su furor. Pero el puente no desaparece. (Ceceña, 2013, p.104)

BIBLIOGRAFÍA

- Ceceña, A. E., 2013. Subvertir la modernidad para *vivir bien* (o de las posibles salidas de la crisis civilizatoria). En Ornelas, R. (coord.), *Crisis civilizatoria y superación del capitalismo*. México, D. F.: Instituto de Investigaciones Económicas, UNAM.
- Cepeda Flores, F. J., 2006. *El Prometeo en México. Raíces sociales y desarrollo de la Facultad de Ciencias, UNAM*. Saltillo: Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, Universidad Autónoma de Coahuila.
- Cocho Gil, Flavio, 2005. *Metapocatástasis de civilización*. México, D. F.: CEFPSVLT.
- Cocho Gil, Germinal, 2013. Complejidad, criticalidad y humanismo creativo. En Vizcaya, E., Pacheco, L. y Miramontes, O. (eds.), *Ciencia y Sociedad: Pinceladas*. [e-book] México: CopIt-arXives. Disponible en: <http://scifunam.fisica.unam.mx/mir/copit/SC0004ES/SC0004ES.html> [consultado el 30 de abril de 2014].
- De la Peña, Luis, 1999. Algunos comentarios desde la física. En Roitman, M. y González Casanova, P. (coords.), *La formación de conceptos en ciencias y humanidades*. Madrid: Sequitur.
- Feynman, R. P., 1983. *El carácter de la ley física*. Barcelona: Antoni Bosch editor.
- Gnedenko, B. V. y Kolmogorov, A. N., 1954. *Limit Distributions for Sums of Independent Random Variables*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Gnedenko, B. V., 1969. *The Theory of Probability*. Moscú: MIR.
- González Casanova, P., 2004. *Las nuevas ciencias y las humanidades*. Madrid: Anthropos-IIS/UNAM.
- Kuhn, T. S., 1982. *La tensión esencial. Estudios sobre la tradición y el cambio en el ámbito de la ciencia*. México, D. F.: Conacyt-FCE.

- Laughlin, R. B., 2007. *Un universo diferente. La reinención de la física en la edad de la emergencia*. Madrid: Katz Editores.
- Martínez-Mekler, G., 2000. Una aproximación a los sistemas complejos. *Ciencias*, núm. 59, julio-septiembre, pp.6-9.
- Martínez-Mekler, G. y Cocho, G., 2011. Complejidad en comportamientos universales en las artes y las ciencias. En Flores Valdés, J. y Martínez-Mekler, G. (comps.), *Encuentros con la complejidad*. México, D. F.: Siglo XXI-UNAM.
- Miramontes, O. y Volke, K. (eds.), 2013. *Fronteras de la física en el siglo XXI*. [e-book] México, D.F.: CopIt-arXives. Disponible en el sitio: <http://scifunam.fisica.unam.mx/mir/copit/TS0011ES/TS0011ES.html> [consultado el 30 de abril de 2014].
- Piaget, J. y Bunge, M. (coords.), 1971. *Les Théories de la causalité*, París: Presses Universitaires de France (EEG, 25).
- Piaget, J. y García, R., 1982. *Psicogénesis e historia de la ciencia*. México, D. F.: Siglo XXI.
- Toffler, A., 1974. *El shock del futuro*. Barcelona: Plaza & Janes.

⊙ *Esta es una página en blanco.* ⊙

HACIA UNA PEDAGOGÍA DE LA COMPLEJIDAD: RESPONSABILIDAD SOCIAL, PENSAMIENTO CRÍTICO Y SISTEMAS COMPLEJOS EN LA EDUCACIÓN CIENTÍFICA *

A la memoria de Richard Levins y Flavio Cocho Gil

INTRODUCCIÓN

¿Qué tipo de ciencias y qué educación científica se requieren en países de bajo desarrollo humano, grandes desiguales y con alta violencia como México? ¿Cómo promover una ciencia que reconozca la complejidad de los sistemas biológicos y sociales y al mismo tiempo vaya más allá tanto del reduccionismo, como del colonialismo, del sexismo y del racismo? A lo largo del tiempo, existen diversas experiencias de científicos interesados y preocupados en responder tanto a este tipo de preguntas como encarar los desafíos prácticos que plantean al interior de sus universidades y campos educativos.¹ En este trabajo presentamos un breve panorama del trabajo que se ha realizado en el Programa de Ciencia y Humanismo de la Facultad de Ciencias, UNAM, y que resume algunos de los retos y experiencias que hemos enfrentado para generar lo que hemos dado en llamar una *pedagogía de la complejidad*, que concierne y está comprometida con su sociedad y su gente.

ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Durante la década de los sesenta del siglo XX, en varias partes del mundo (Estados Unidos, Francia, Italia, por ejemplo) emergieron diversos movimientos sociales, estudiantiles y juveniles que criticaban diversas formas del autoritarismo político y los valores culturales imperantes (guerra de Vietnam, conservadurismos sexuales y otros).² En el caso de México, nació un movimiento estudiantil que protestó

* Ensayo escrito por Octavio Valadez, Eduardo Vizcaya, Hugo I. Cruz y Germinal Cocho. Es una versión en español del ensayo "Towards a pedagogy of complexity...", publicado en: *Conference Proceeding. New Perspectives in Science Education*. 5th Conference Edition, Florence, Italy, 17-18 March 2016. Edited by Pixel, pp. 520-524.

¹ Moore, K. (2008). *Disrupting Science: Social Movements, American Scientists, and the Politics of the Military, 1945-1975*. Princeton University Press.

² Ferguson, N., Maier, C. S., Manela, E., Sargent, D. J., Adelman, J., Borstelmann, T., et al. (2011). *The Shock of the Global: The 1970s in Perspective*. London: Belknap Press.

y se organizó contra el autoritarismo político y las formas represivas de ejercicio del poder. La respuesta del Estado culminó con la masacre de Tlatelolco en 1968, donde cientos de estudiantes fueron asesinados, y otros tantos encarcelados y perseguidos.³ A pesar de estos trágicos acontecimientos, el debate y la reflexión prevaleció al interior de las universidades, sobre todo en lo relacionado al papel de las ciencias y las humanidades frente al uso violento e ilegítimo del poder político, así como por el cumplimiento de la función social de las universidades públicas.

En este marco, y bajo la dirección de profesores de áreas científicas,⁴ nació a principios de los setenta el Programa de Ciencia y Sociedad (PCyS) en la Facultad de Ciencias (FC) de la UNAM. Este Programa tuvo como eje rector el de fomentar una educación e investigación científica enfocada sobre el carácter dinámico y cambiante de la realidad física, biológica y social. Se trataba, además, de promover una conciencia crítica acerca de las estructuras de poder, económicas y políticas, que sostienen al aparato científico.

Estas ideas se materializaron en al menos cinco rubros:

Contenidos de investigación. Desarrollo de líneas de investigación en la física, biología y matemáticas que se enfocaran en los procesos dinámicos y no lineales de los sistemas naturales y sociales; lo que hoy se conoce como sistemas complejos.

Educación científica. Implementación de cursos y seminarios en los planes de estudio de las carreras científicas, donde se incorporaron elementos históricos, filosóficos y sociológicos a los enfoques sobre la historia de las ideas.

Divulgación científica. Organización de conferencias y debates públicos sobre los problemas contemporáneos de la sociedad, como el uso de la ciencia en la industria militar, la explotación y devastación económica por parte de las grandes corporaciones, y sus implicaciones en el desarrollo de países subdesarrollados como los de Latinoamérica.

Democratización universitaria. Implementación de asambleas, cuerpos colegiados y otros mecanismos de participación de la comunidad universitaria, en tanto formas de ejercicio democrático y participativo en la toma de decisiones al interior de la FC.

Vinculación social. Realización de trabajo en comunidades, mediante prácticas de campo donde los profesores y estudiantes pudieran conocer de cerca las necesidades y problemas de las comunidades urbanas y rurales.

A pesar de que el PCyS no logró permanecer como movimiento y de que fue diluyéndose (debido a diversos factores, entre los que se encuentra el éxodo de sus miembros a otras universidades), sí logró incidir con sus propuestas tanto en la estructura académica como en las formas administrativas de la FC. Las huellas de sus propuestas se han ido transformando con los años, aglutinándose en al menos

³ Nelsson, R. (2015, November 12). How the Guardian reported Mexico City's Tlatelolco massacre of 1968. *The Guardian*. Recuperado el 20 de octubre de 2016, del sitio: <http://www.theguardian.com/cities/from-the-archive-blog/2015/nov/12/guardian-mexico-tlatelolco-massacre-1968-john-rodga>

⁴ La transformación de la universidad mexicana y el caso de la Facultad de Ciencias, UNAM. Propositiones del Programa de Ciencia y Sociedad (1977). Disponible en: <http://www.naturalezacienciaysociedad.org/wp-content/uploads/2013/03/PCyS-1977.pdf>

tres rubros: i) la incorporación de las asignaturas optativas “Ciencia y Sociedad” y “Naturaleza y Sociedad” en los planes de estudio; ii) una estructura de decisión académica más colegiada al interior de la FC (los consejos departamentales), y iii) la fundación del Departamento de Sistemas Complejos en el Instituto de Física de la UNAM, espacio pionero para el estudio de sistemas abiertos y dinámicos tanto en la naturaleza como en la sociedad.

DESAFÍOS Y TRABAJOS CONTEMPORÁNEOS

En el año 2011, una nueva generación de profesores recupera esta historia para impulsar y fortalecer las asignaturas “Ciencia y Sociedad” y “Naturaleza y Sociedad”, fundando la Coordinación “Naturaleza, Ciencia y Sociedad” (cNCys), con la que se buscaba, además, organizar diversas actividades académicas semi y extra-curriculares, contemplando tanto la divulgación como el debate al interior de la Facultad de Ciencias. Un ejemplo de estas actividades fue la organización de un coloquio conmemorativo de los 50 años de la publicación del libro de Thomas S. Kuhn, *La estructura de las revoluciones científicas*, ícono de una visión histórica y social de la ciencia.⁵

A través de estos cursos y actividades la cNCys logró generar y fortalecer redes con otras instancias académicas como: el Seminario Interinstitucional de Filosofía de la Biología,⁶ el Diplomado de Medicina y Complejidad,⁷ la editorial virtual CopIt-arXives,⁸ la Unión de Científicos Comprometidos con la Sociedad,⁹ y otros proyectos cercanos al Centro de Ciencias de la Complejidad¹⁰ de la UNAM.

Las preguntas y principios que han guiado a la cNCys se relacionan con: i) la responsabilidad que tienen los científicos, en tanto profesores e investigadores, ante las enfermedades complejas, las nuevas tecnologías, y ante los desafíos políticos y ecológicos del sistema capitalista; ii) la necesidad de una comprensión de las experiencias científicas que han tratado de resistir a la subordinación impulsada por los poderes económicos y políticos hegemónicos; y iii) el diálogo transdisciplinario entre las ciencias de frontera (i.e. sistemas complejos, eco-evo-devo, evolución cultural, temas de género) y diversas áreas de las humanidades contemporáneas (filosofía de la ciencia, historia de la ciencia y sociología de la ciencia, estudios poscoloniales, etc.).

El horizonte de trabajo de la cNCys quedó expresado así:¹¹ “Fomentar la formación de científicos con conciencia de sus responsabilidades éticas y socioambientales; la reflexión crítica y autocrítica sobre las implicaciones sociales de la labor

⁵ http://www.naturalezacienciaysociedad.org/wp-content/uploads/2012/10/Kuhn_programa.pdf

⁶ <http://www.phibio.org/>

⁷ <http://www.medicinaycomplejidad.org>

⁸ <http://scifunam.fisica.unam.mx/mir/copit/>

⁹ <http://www.uccs.mx/>

¹⁰ <http://c3.fisica.unam.mx/>

¹¹ Introducción, p.x. En *Ciencia y Sociedad: Pinceladas*, <http://scifunam.fisica.unam.mx/mir/copit/SC0004ES/SC0004ES.html>

científica; el intercambio inter y transdisciplinario, así como la defensa de la dignidad humana con dimensiones planetarias”.

Siguiendo estas ideas, en el año 2014 y con el apoyo de más profesores e investigadores, se decide ampliar la cNCyS y fundar el Programa de Ciencia y Humanismo como una estructura académica que lograra reconocimiento y apoyo institucional para articular tanto las asignaturas optativas (“Ciencia y Sociedad”, “Naturaleza y Sociedad”, y “Sistemas Complejos” –esta última como temario del Seminario de Matemáticas Aplicadas–), como generar labores de diseminación e impulsar líneas de investigación. En este programa se retoma el carácter crítico y anticapitalista de la experiencia del “viejo” Programa de Ciencia y Sociedad de los años setenta, pero también se han agregado nuevas líneas de trabajo, que incluyen una discusión más sistemática de las fronteras científicas, así como un énfasis en la relación entre humanidades y ciencias naturales.

En la práctica, el PCyH ha promovido también el pensamiento crítico entre los estudiantes de ciencias, abarcando tanto la didáctica como la estructuración de los cursos semestrales. Un concepto clave es el de la “autogestión académica” donde se busca construir espacios de enseñanza autoorganizados¹² por los propios estudiantes y donde el profesor no impone los temas, la dinámica, ni la interpretación última de las discusiones científicas y su relación con las crisis sociales. A diferencia del PCyS, en el PCyH se ha incluido el empleo de las tecnologías de la información y las redes sociales como Facebook, Youtube, etc. para promover la discusión pública de textos, promoción de actividades de extensión académica, presentaciones de libros, etc. Por ejemplo, los controles de lectura de los textos aparecen como entradas de un blog, donde otros estudiantes pueden ver las diversas interpretaciones posibles de las lecturas.

IMPLICACIONES Y DISCUSIONES TEÓRICAS DESDE LAS PRÁCTICAS

Con estos antecedentes se ha trabajado en la formulación de lo que hemos dado en llamar *pedagogía de la complejidad*; pedagogía, porque se trata de una continua reflexión y sistematización del problema de la educación científica, en específico, de aquellas teorías y modelos de los sistemas complejos y de las interacciones entre las disciplinas científicas y las humanidades. La *pedagogía de la complejidad* busca contribuir a la construcción de planes de estudio para la formación de nuevos científicos que asuman los desafíos ecológicos, políticos y económicos del mundo contemporáneo y del mundo futuro.

La base de esta pedagogía se encuentra en una concepción de la ciencia donde se reconocen varios tipos de actividades: i) la ciencia como forma de *modelar* y de *explicar*, es decir, los aspectos de la ciencia relacionados con la construcción y contrastación empírica de sus teorías, y los modelos que genera sobre los fenómenos

¹² Revueltas, J. (2008). Nuestra bandera. ¿Qué es la autogestión académica? Autogestión académica y universidad crítica. OSAL, IX(24), <http://biblioteca.clacso.edu.ar/clacso/osal/20110418113055/09revuelta.pdf>

físicos, biológicos y sociales;¹³ ii) la ciencia como una forma de *valorar e intervenir*, es decir, los aspectos donde se recupera tanto el carácter interpretativo e histórico de los modelos científicos, como la incorporación de creencias y de prejuicios culturales, así como la continua relación de la ciencia con los campos productivo y político.¹⁴

Esta visión ampliada de la ciencia, y también de la pedagogía, nace de una continua reflexión de las categorías que se han formulado en la filosofía, los estudios sociales y la historia de la ciencia. Por ejemplo, para el caso de las explicaciones y los modelos, la discusión filosófica incluye la diversidad de metodologías que existen en las ciencias, y que no son reducibles a las matemáticas o algún otro formalismo, sino que pueden guardar cierta autonomía (epistémica u ontológica) entre ellas (por ejemplo, las distinciones entre explicaciones en biología y en física). Aquí podemos localizar los debates sobre las reificaciones y los reduccionismos, es decir, los modos perniciosos o abusivos de concluir realidades concretas a partir de abstracciones científicas, por otro lado, basadas en modelos inherentemente limitados y acotados.¹⁵ Al reconocer el carácter evaluativo e interpretativo de la ciencia, se abre una discusión sobre los aparatos institucionales y culturales donde el conocimiento científico se inserta. Se trata de una continua historización de la producción científica que permita comprender cómo, por ejemplo, en determinados momentos de la historia las ciencias han sido o son mecanismos para la explotación de la naturaleza y del ser humano, y no sólo la explicación de preguntas basadas en la curiosidad o en metas éticas.¹⁶

Ahora bien, el aspecto pedagógico se entiende aquí como el desafío de contribuir a la educación de futuros científicos que puedan tomar decisiones responsables y éticas, en sus diversas actividades como profesionales (investigación, divulgación, docencia, etc.). El desafío sigue siendo el de recuperar el carácter antidogmático, al mismo tiempo que propositivo y creativo de la ciencia, para resolver problemas concretos de las poblaciones que financian las instituciones científicas-públicas. En este contexto, las ciencias de la complejidad pueden, *de la mano de un aparato ético e histórico*, servir como posibles ejemplos de ciencias que reconocen el carácter dinámico, diverso y transformable de la realidad.

En resumen, una *pedagogía de la complejidad*, estaría conformada por los siguientes elementos:

1. *Contenidos empíricos diversos*. Se reconoce una ontología no sólo de entidades, sino de procesos, que es además heterogénea y contradictoria.
2. *Categorías, modelos y esquemas explicativos diversos*. Donde se reconoce la no reducibilidad de una ciencia a otra, sino la diversidad también de metodologías, mo-

¹³ Fraassen, B. C. van. (2008). *Scientific Representation: Paradoxes of Perspective*. Oxford University Press.

¹⁴ Mol, A. (2003). *The Body Multiple: Ontology in Medical Practice*. Durham: Duke University Press Books.

¹⁵ Winther, R. G. (2006). On the dangers of making scientific models ontologically independent: Taking Richard Levins' warnings seriously. *Biology and Philosophy*, 21(5).

¹⁶ Haraway, D. (1988). Situated Knowledges: The Science Question in Feminism and the Privilege of Partial Perspective. *Feminist Studies*, 14(3), 575-599. <http://doi.org/10.2307/3178066>

delos y formas de entender la realidad social y natural, siempre que éstas permitan tener una idea clara de su grado de correspondencia entre el modelo generado y la realidad que se describe.¹⁷

3. *Valoración e interpretación contextualizada.* Hacer visibles, no sólo los conflictos de intereses, sino las diferencias de cosmovisiones que pueden emanar desde diferentes posiciones: geopolíticas, de género, clase y raza, para la realización de la ciencia.¹⁸ Aceptar que todo sistema axiomático y de estructura lógica en el que hacer científico es válido solamente dentro de su universo de interpretación: fuera de éste, puede perder su validez.

4. *Intervención prudente y acotada por la ética.* Comprender y visualizar formas de realización tecnológica del conocimiento científico que no pasen solamente por la privatización de los medios de producción de medicamentos, alimentos u otras necesidades humanas.¹⁹

5. *Pensamiento crítico situado.* Posicionada-hermanada con las víctimas humanas y no humanas de los sistemas de explotación económica, discriminación y violencia por raza, género, sexo o nacionalidad.²⁰

La implementación de estos cinco elementos en nuestra práctica docente ha permitido generar en los estudiantes la inquietud por entender la ciencia y sus modelos como procesos históricos, susceptibles de ser desarrollados, modificados o rebatidos, y que en su momento ha generado un interés hacia el estudio de la diversidad biológica, física y social contemporáneas.

REFLEXIONES CONCLUYENTES

En este trabajo hemos presentado una experiencia de trabajo que apunta a la generación de una educación científica que promueva una ciencia ética y responsable ante los grandes desafíos económicos, políticos y culturales que atraviesa el mundo, pero principalmente países con un desarrollo similar al de México. Mediante diversas actividades, como cursos, seminarios, conferencias y libros de texto (en proceso), el Programa de Ciencia y Humanismo de la Facultad de Ciencias, UNAM, ha logrado avanzar en la construcción de una *pedagogía de la complejidad*, donde el conocimiento y el mismo proceso de aprendizaje se sitúan históricamente, donde se abren debates contemporáneos sobre los usos y abusos de las ciencias, donde se promueve la participación crítica de los estudiantes hacia una autogestión académica dentro y fuera de la universidad, y posicionándose a favor de una práctica científica restringida por la ética que considere los posibles daños sociales y ambientales, así como la procuración del bien común.

¹⁷ Hacking, I. (2004). *Historical Ontology*. Harvard University Press.

¹⁸ Lewontin, R. C. (1992). *Biology as ideology: the doctrine of DNA*. New York, NY: HarperPerennial.

¹⁹ Lewontin, R., & Levins, R. (2007). *Biology Under the Influence: Dialectical Essays on Ecology, Agriculture, and Health*. Monthly Review Press.

²⁰ Horkheimer, M. (2004). *Teoría Crítica*. Amorrortú.

AGRADECIMIENTOS

Octavio Valadez agradece el apoyo del proyecto SEP-CONACYT 182084. Todos los autores agradecen a la UNAM a través del proyecto PAPIIME PE106516.

⊙ *Esta es una página en blanco.* ⊙