

COMPLEJIDAD Y SISTEMAS COMPLEJOS: UN ACERCAMIENTO MULTIDIMENSIONAL

Gerardo A. Laguna Sánchez ⊙ Ricardo Marcelín Jiménez
Geraldine A. Patrick Encina ⊙ Gerardo Vázquez Hernández
(Coordinadores)

César A. Abarca-García • Ricardo Barrón-Fernández • Lidia Ivonne
Blásquez-Martínez • Derik Castillo-Guajardo • Nareli Cruz-Cortés • Gerardo A.
Laguna-Sánchez • Octavio Francisco González-Castillo • Cecilia
González-González • Valeria Hernández-Hernández • Lidia Jiménez-Lara •
Ricardo Marcelín-Jiménez • Celia Oliver-Morales • Geraldine A. Patrick-Encina

EditoraC3
CopIt-arXives
Publishing Open Access
with an Open Mind
2016

Este libro contiene material protegido por leyes de autor

Todos los derechos reservados © 2016

Publicado electrónicamente en México, por CopIt-arXives y EditoraC3

Diseño de portada por Octavio Miramontes con base en la obra “Ajolote” de David Lara.

Obra editada por Mariana Benítez, Eduardo Vizcaya, Octavio Miramontes, Eugenio Azpeitia y Lorena Caballero.

Complejidad y sistemas complejos: un acercamiento multidimensional

[Coordinadores] G. Laguna-Sánchez et al. — México CDMX: CopIt-arXives y EditoraC3, 2016

Incluye bibliografías e índice

ISBN: 978-1-938128-10-3 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 www.wikimedia.org o bien de los autores, a menos que se señale lo contrario explícitamente.

Los editores agradecen el apoyo de DGAPA-UNAM a través del proyecto PAPIIT IN-105015

ISBN: 978-1-938128-10-3 ebook

<http://scifunam.fisica.unam.mx/mir/copit/>

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 \odot Centro de Ciencias de la Complejidad

La humanidad es el resultado de un esfuerzo intenso y sobrevive gracias a la continuidad de ese esfuerzo, por medio del cual se va perfeccionando hasta llegar al fin a tal perfección, que podrá descubrir y hacer todo, porque en ella se irán depositando las manos y el corazón de los dioses [...] la suprema ley es vivir cerca-junto, como los dedos de la mano, y descubrir y hacer con el esfuerzo unánime de todos.

Estanislao Ramírez Ruiz (1887-1962)

Me interesó ver cómo se relaciona lo que están haciendo los zapatistas con las ciencias de la complejidad. Ellos no están haciendo un autogobierno de una autoridad, sino de un sistema de comunidades. Y una cosa que creo que debemos de estudiar cada vez más es cómo se organizan sistemas de cooperativas. Cómo se organizan sistemas de comunidades. Cómo se organizan sistemas para la emancipación humana.

Pablo González Casanova, México, D.F., 2013

Quiero incitar a una visión distinta de la ciencia, la visión dialéctica, que critica el reduccionismo diciendo que la verdad es un todo más grande de lo que habíamos imaginado, que cosas que no parecen relacionadas sí tienen influencia una sobre la otra, que podemos preguntar qué pasa con la adrenalina en la minería, cuál es la situación del riñón bajo el capitalismo, cómo funcionan los pulmones entre los pobladores forestales, porque nuestra biología es a la vez social y biológica.

Richard Levins, Ciudad Universitaria, D.F., 2013

El ajolote anuncia la época de Gödel: en la medida que, gracias a la razón moderna, el mundo se vuelve más consistente, aparecen más evidencias de que existen verdades que escapan al sistema dominante. La única manera que algunos han encontrado de abarcar al Otro, a las otras verdades, consiste en desbaratar la consistencia de su mundo: pero se cae en el vértigo del desorden total, en el delirio de la ausencia de límites y fronteras, en el reino de la entropía.

Roger Bartra, *La jaula de la melancolía*

⊙ *Esta es una página en blanco.* ⊙

ÍNDICE

PROEMIO	VII
----------------	------------

INTRODUCCIÓN

Complejidad creciente, rapidez en los cambios e incertidumbre	XV
Caos y complejidad o el desafío de la relación entre causas y efectos	XV
Desafíos de la sociedad y nuevos modelos de pensamiento científico . . .	XVI
Contenido del libro	XIX
Primera sección. El carácter multidimensional y transversal de lo complejo, y la necesidad del trabajo colaborativo	XX
Segunda sección. Los límites del determinismo y la predicción en las ciencias duras	XX
Tercera sección. Redes y sistemas complejos: modelos y aplicaciones para abordar las interacciones en el mundo real	XXI
Cuarta sección. Nuevas visiones sobre la evolución: del ámbito bio-cultural al estudio del comportamiento gregario y genético con innovaciones computacionales	XXI
Motivación última	XXIII

El carácter multidimensional y transversal de lo complejo,
y la necesidad del trabajo colaborativo

SOBRE LO COMPLEJO Y SU TRATAMIENTO MULTIDIMENSIONAL

<i>Gerardo A. Laguna-Sánchez</i>	1
Un profeta de la complejidad	1
Los dados de Dios: Caos y Cosmos	3
Más allá de Einstein	4
Ilya Prigogine y el orden a partir del caos	6
Norbert Wiener y Arturo Rosenblueth en el desarrollo de la cibernética	7
Stanislaw Ulam: una fuente de inspiración	8

La ciencia de lo complejo hoy	9
La ciencia de lo complejo en México	10
El pensamiento complejo: la propuesta filosófica de Edgar Morin	11
Reto y divertimento	15
Bibliografía	16

SUSTENTABILIDAD Y LA UNIVERSIDAD DEL SIGLO XXI:

APROXIMACIONES AL CONOCIMIENTO Y AL TRABAJO COLABORATIVO	
<i>Octavio Francisco González-Castillo</i>	17
La necesidad de religar	17
Reduccionismo y especialización disciplinar: logros y limitaciones	18
Más allá de la disciplina	21
Orientación disciplinar del conocimiento	22
Orientación disciplinar de la dinámica de trabajo	24
Mapa conceptual desde el enfoque de los sistemas	30
Tendencias disciplinares frente al paradigma de la sustentabilidad	33
Integrando algunas propuestas	34
Reintegración de la visión del socio-ecosistema como un concepto transdisciplinar	35
Apertura intercultural	36
Ampliación de la participación hacia todos los actores involucrados	36
Corresponsabilidad transversal de las instituciones involucradas	37
Retos y oportunidades para las universidades	38
Propuestas para el desarrollo futuro de la Universidad	39
A manera de conclusión	42
Bibliografía	44

Los límites del determinismo
y la predicción en las ciencias duras

SISTEMAS DINÁMICOS Y CAOS:

LOS LÍMITES DE LA PREDICCIÓN	
<i>Lidia Jiménez-Lara</i>	47
Buscando el orden, terminamos en el caos	48
El caos en la física	54
El encanto de los sistemas no-lineales	55
Lo complejo de lo simple y el caos	59
Cuantificando el caos	63
Complejo y complicado, caos en el sistema solar	65
Predicción en sistemas caóticos	68
Bibliografía	70

GÖDEL, EL TEOREMA DE INCOMPLETITUD	
Y SUS IMPLICACIONES EN LA ARITMÉTICA	
<i>Gerardo A. Laguna-Sánchez / Ricardo Barrón-Fernández</i>	71
La esencia de las matemáticas	71
El lenguaje de la aritmética	73
Números de Gödel	75
La paradoja de Ricardo en su versión coloquial	77
El enfoque computacional de las proposiciones metamatemáticas	79
Cómo expresar la auto-referencia en forma aritmética	80
Un bosquejo para el teorema de incompletitud de Gödel	82
Algunas consideraciones finales sobre las implicaciones del teorema de incompletitud de Gödel	83
Bibliografía	84
Redes y sistemas complejos: modelos y aplicaciones para abordar las interacciones en el mundo real	
TEJIENDO REDES:	
DESDE LAS CÉLULAS HASTA LOS ECOSISTEMAS	
<i>Valeria Hernández-Hernández / Cecilia González-González</i>	85
Las nubes que murmuran	85
La escalera a la complejidad	86
«enREDando» a la complejidad	87
Bajo la lupa de la redes... se pueden estudiar a los sistemas moleculares	90
...y los sistemas ecológicos también	92
Conclusión	96
Bibliografía	97
LUCIÉRNAGAS E INTERNET:	
LA MAGIA DE LAS REDES COMPLEJAS	
<i>Ricardo Marcelín-Jiménez</i>	99
Un preludio luminoso del amor	99
El pariente de un amigo muy cercano...	100
La inevitable existencia de los chicos “populares” y otras calamidades	103
Internet y la gran telaraña mundial	107
Bibliografía	110

EL VÍNCULO QUE NOS UNE: LAS REDES VIVAS	
<i>Derik Castillo-Guajardo</i>	111
El vínculo de los seres vivos	111
Redes tróficas	113
Redes de competidores	115
Parásitos en la red	117
De las redes a las cascadas tróficas	118
Caso 1. Los arrecifes de coral	119
Caso 2. El parque de Yellowstone	119
Bibliografía	120
TEJIENDO LA RED SOCIAL:	
INDIVIDUOS COMPLEJOS EN MUNDOS COMPLEJOS	
<i>Lidia Ivonne Blásquez-Martínez</i>	121
La contingencia de lo real	121
Ecología política	124
Contingencias humanas y ecológicas	125
La complejidad de la sociedad globalizada	126
Bibliografía	126
Nuevas visiones sobre la evolución: del ámbito biocultural al estudio del comportamiento gregario y genético con innovaciones computacionales	
EL JUEGO DE LOS REFLEJOS:	
EVOLUCIÓN BIOLÓGICA Y CULTURAL	
<i>Celia Oliver-Morales / César A. Abarca-García</i>	127
La fusión que viene	128
Acerca de una fusión que cambió la vida planetaria: cuando los alebrijes se formaron	129
Uno de los lados de la misma moneda	131
Otro de los lados de la misma moneda	133
Sobre las bolas de cristal y otros oráculos	134
Dos ejemplos en donde se funde la evolución biológica con la cultural	135
Ciertamente «Los viajes ilustran»	139
Bibliografía	139

PANARQUÍA EN ZANBATHA:

UNA HISTORIA DE LOS CICLOS ADAPTATIVOS EN EL VALLE DE LA LUNA

Geraldine A. Patrick-Encina

141

¿Qué es la Panarquía?	142
Ciclos adaptativos de los sistemas anidados	142
Las fases de los ciclos adaptativos	143
¿La figura en forma de ocho se da siempre?	145
Los humanos, creadores de realidades virtuales	145
Vivimos en una paradoja: queremos cambiar, pero no tanto	146
¿Por qué no se ha colapsado el mundo?	147
Confabulaciones para el colapso	147
¿Dónde está Zanbatha?	148
Panarquía en Zanbatha	149
Historias anidadas en historias	150
Fases que duraron milenios	150
Primer ciclo adaptativo del Modo de Vida Lacustre (MVL)	152
El segundo ciclo del MVL, en pleno tiempo teotihuacano	153
Un eclipse da pauta a la militarización del naciente señorío matlatzinca	155
La cohesión social y las múltiples actividades del MVL, algo nuevo para los nahuas	155
Fase omega del segundo ciclo: el MVL es debilitado por los mexica-tenochcas y destruido por los españoles	156
La reorganización es posible gracias a la milenaria inercia cultural: ingre- so al tercer ciclo	158
Reivindicando el territorio humedal y el MVL: la fase de crecimiento del tercer ciclo	158
Se ingresa a un proceso de acumulación, aunque no por mucho tiempo.	159
El sistema capitalista se inserta de lleno en la zona lacustre	160
¿El colapso del tercer ciclo fue para siempre o somos testigos de un resurgimiento?	160
El modelo de los sistemas adaptativos: un marco de referencia que alienta la esperanza	161
Bibliografía	162

EVOLUCIÓN Y HEURÍSTICAS BIOINSPIRADAS:

LAS NUEVAS HERRAMIENTAS DE LA COMPUTACIÓN

Ricardo Marcelín-Jiménez

165

El problema del agente viajero	165
La evolución al rescate, o ecos del viaje de Charles Darwin a las Galápagos	167
Otras recetas para viajar con una cartera pequeña	170

El <i>jet-set</i> de los problemas de la ciencia de la computación	172
Bibliografía	174

EVOLUCIÓN Y ALGORITMOS GENÉTICOS:**ORÍGENES, PRECURSORES Y APLICACIÓN**

<i>Gerardo A. Laguna-Sánchez / Nareli Cruz-Cortés</i>	175
---	------------

El genial «Johnny» von Neumann	175
John Holland y los programas que «evolucionan»	177
El algoritmo genético: 1a. aproximación	177
La efectividad de los AG para resolver problemas del mundo real	179
La clave detrás de los AG	179
Campos afines a los AG	180
Ejemplo práctico de un algoritmo genético	180
Un problema típico de optimización	181
Identificación de los individuos y codificación de valores	182
Representación de genotipos	184
Cálculo de aptitud	185
Selección y cruza	185
Mutación	186
Reemplazo de la generación anterior por la nueva	187
Algoritmo genético: 2a. aproximación	188
Bibliografía	189

LA EVOLUCIÓN DE LA COOPERACIÓN... ENTRE COMPUTADORAS

<i>Ricardo Marcelín-Jiménez</i>	191
---------------------------------	------------

El dilema de los prisioneros	191
Atrapados en el tiempo, o receta para querer a tu adversario	193
Computadoras y juegos estratégicos	196
Bibliografía	198

PROEMIO

SE ha dicho, con justa razón, que los prólogos, los proemios y los prefacios son una estafa perpetrada al lector, porque desarrollan un discurso sobre cosas que no han sido tratadas, para eso está el texto, dejando a quien se enfrenta a esas líneas en la desazón y en la falsa creencia de que, probablemente, no sabe leer... Así, se despliegan, una tras otra, frases comprensibles sólo a medias y, después de todo, el lector podrá hacerse una idea más correcta al final de la lectura de la obra. ¿Cómo evitar incurrir en ese error? Obviamente, no escribiendo un proemio, prólogo o prefacio; sin embargo, existe una segunda posibilidad, a saber, la de escribir un exhorto en el que, de igual a igual, se comparte una pasión y, con suerte, se contagia.

En nuestro caso, la pasión que deseamos contagiar es el asombro *en lo real*; bien afirmaba Pascal, en paráfrasis nuestra, de que primero se cansará la imaginación de imaginar que la realidad de proveer. No obstante, ese asombro no puede tener nada de estático sino que, por el contrario, es una manifestación permanente de la enfermedad llamada *insatisfacción*. Este principio es la columna vertebral del *pensamiento complejo* que, desde el punto de vista de la epistemología, aspira al acercamiento asintótico a lo real. ¿Qué quiere decir eso? Pues bien, que desde sus comienzos el hombre se ha preguntado acerca del mundo que le rodea y, muy pronto, cayó en la cuenta de que él mismo formaba parte de ese mundo, al grado de no poder concebirse como una realidad aparte, al menos en lo que concierne a la materialidad; empero, nunca quedó claro, hasta hoy, si sólo la materia podría agotar la explicación por el hombre, por sus anhelos, sus temores, sus pensamientos, reacciones viscerales, percepciones e interpretaciones, etc. Además, las explicaciones de la diversidad indefinidamente grande entre los seres vivos, apenas comienza a surgir con timidez y gran incertidumbre: desde los infusorios y las amibas de vida libre, hasta la organización del cerebro humano y su viabilidad, desde la lógica de un enjambre de abejas hasta los fenómenos de emergencia social como son las tribus urbanas.

Es posible en cierto modo confundir en sistemas *hipercomplejos*, como los mencionados, las características de lo "complejo" y de lo "complicado", al grado de convertirlos en vocablos equivalentes. No es así: cuando decimos que algo es complicado, apuntamos a nuestra mayor o menor capacidad epistemológica para comprender la realidad del objeto de nuestro estudio; en cambio, cuando afirmamos la complejidad de algo, estamos señalando una *propiedad* del objeto, independiente

de mis mayores o menores capacidades técnicas para comprenderlo. Ciertamente suelen presentarse juntos, ambos polos del saber, puesto que yo, ser cognoscente, quedo inevitablemente subsumido por la realidad toda. El momento de la exterioridad, lo bello, sólo puede relacionarse con el momento de la trascendencia, lo verdadero, a través de ese otro momento que es la interioridad, lo real.

La complejidad es la propiedad cardinal de lo real: señala el hecho de que para un sistema dado, ante un conjunto de condiciones en el espacio y en el tiempo, se plantea más de una solución posible a su evolución. Esto no forzosamente implica la introducción de las probabilidades y de la estadística en la descripción del mundo; más bien se pone en evidencia la naturaleza no lineal en los procesos de auto-organización de la realidad física, química y biológica. Así y todo, lo complejo tiende, por vocación, un puente entre lo bello, que es el mundo de los conceptos, y lo verdadero, que es el mundo de la efectividad y de la aplicabilidad, siendo que la complejidad se mueve en el mundo de la comunicación. Detengámonos, así sea brevemente, en este punto de la estética de lo complejo.

El alma de un arte es la *estética*, igual que para una ciencia lo es la *realidad*. Así, el pensamiento sobre el mundo tiene de las dos, sin llegar a coincidir nunca totalmente con ninguna de ellas, ni siquiera con la suma de ambas. ¿Por qué? Porque el pensamiento, por medio y a través del método, a manera de procedimiento y avance, se fija fenomenológicamente, como *desiderátum*, la unión de lo concreto universal y de lo universal concreto, es decir, del ser humano integral. Lo que comúnmente llamamos lo “correcto” puede ser un aspecto fundamental en la construcción de su sentido... Habría mucho más que decir al respecto, pero ello nos apartaría de nuestro objetivo principal.

La existencia bella pero aislada, irrelativa y atemporal, expresa la esencia elemental propia de una concepción mitológica del mundo. El concepto estético que traduce en el arte esta concepción es el de *forma externa*, comprendida como autonomía absoluta de lo bello. Ello nos conduce a un mundo de *conceptos*, el dios mítico, el mundo plástico y el héroe trágico, que vive en monólogo: el mundo es, en esta perspectiva, un acertijo por resolver, nada más. El movimiento o estado de lo bello es la *lógica*: estática y equilibrio, simetría, determinismo, reduccionismo y holismo, en pocas palabras, *unidad*. La unidad, como concreción del pensamiento, busca una escala a partir de la cual proporcionar el conocimiento y la experiencia de la existencia del mundo físico. Por eso, la concepción unitaria de la realidad es, en esencia, *álgebra de la percepción* de lo múltiple e integración epistémica del mundo. La unidad se manifiesta como el pre-lenguaje.

En el ámbito de lo real, el arte del pensamiento romperá el aislamiento y la autosuficiencia de la forma externa de lo bello, que se encarna en la *forma interna de la obra y que llena de enjundia al espectador*, dejando aparecer los tres factores que lo constituyen como un proceso real, temporal y lingüístico. Así, este proceso real por el cual una idea inicial toma forma en una obra y libera su sentido gracias a su transmisión, pertenece ya al orden de la *comunicación*. El movimiento o estado de lo real es la *dialógica*: dinámica y desequilibrio, transiciones de fase y rupturas de simetría, método, transdisciplina, en pocas palabras, *complejidad*. Como ya lo

hemos dicho arriba, la complejidad es la propiedad por excelencia de lo real, tanto que, vamos, decir “realidad compleja” es un pleonasma; lo que llamamos “simple” no es más que el grado más bajo de la complejidad y es un ardid para aislar variables, en la esperanza de que la suma total de los comportamientos aislados represente lo real. No siempre es así.

En el momento de proceder en la investigación, lo mínimo del saber se ancla en la *coherencia*; la coherencia en el método inicia el sentido en el estado de lo adecuado y, de ahí, secuencialmente, los modos de lo real en su complejidad son lo épico, lo lírico y lo dramático, siempre teniendo recurso a la estética. Lo *épico* es precisamente la categoría estética que corresponde al momento de la *creación*, pues se refiere a la unidad pre-estética de ese proyecto creativo, pero en tanto ejecutado por la aplicación del artista en la obra. Lo *lírico* es la categoría estética que se refiere a la manifestación de la obra en una plétora de detalles particulares; el carácter lírico resulta de la belleza de sus detalles, cada uno de los cuales es fuente de una singular hermosura, de un placer estético nuevo. Lo *dramático* es la categoría estética que corresponde al momento en el que la obra sólo le habla o dice al espectador pues, sin él, carecería de realidad: produciendo lienzos pintados, piedras esculpidas, hojas escritas, cuerpos sanos, teoremas demostrables, no es como pasa verdaderamente el arte a la vida real, ya que debe el arte, en cambio, *recrear hombres...* Esto significa que lo dramático se refiere a la obra en tanto totalidad consumada en la configuración de sus detalles.

Finalmente, en el terreno de lo verdadero, como actor del pensamiento, el arte trasciende las instancias de lo bello y de lo real y se convierte en un factor que crea un mundo *común* para todos aquellos que reciben la obra, y que lo hace al modo de una comunidad anticipadora de lo verdadero. La consecuencia es que el arte del pensamiento complejo, desde el punto de vista sistemático, es la efectividad o la aplicabilidad que suceden a lo bello y a lo real, las tecnologías. El movimiento o estado de lo verdadero es lo *coral*: sistemas abiertos, estructuras disipativas y auto-organización, devenir, sentido (significado y dirección), en pocas palabras, *organización*.

La complejidad de los sistemas abordados en este libro exige una reformulación del concepto de *entropía*: se define la variedad como inversamente proporcional a la cantidad de información necesaria para distinguir un subsistema de los otros, utilizando sólo la información de las correlaciones entre los subsistemas (núcleos funcionales en el cerebro humano; facultades e institutos en una universidad; grupos de información y de transformaciones; nodos en las redes, conjuntos socio-políticos y culturales; órganos, individuos, familia, relaciones interpersonales, sistemas hospitalarios, nación, planeta, etc.). Cuanto más distinguible sea un sistema de otro, mayor será la variedad de posibles relaciones entre ellos, más *complejo* será el sistema y mayor será su capacidad de auto-organización. En efecto, uno de los elementos más frustrantes en la generación de modelos de la realidad es que muchas veces el método, que ha probado en gran medida sus bondades a lo largo de muchos años, no siempre permite apreciar la realidad con sus dislocaciones, e inclusive la realidad del ser humano que las padece.

El arte del pensamiento complejo consume su capacidad de significar cuando pasa de ser lenguaje dialógico a ser lenguaje coral. A la constitución de la comunidad operada por el pensamiento complejo, en cuanto es él quien temple y afina el alma individual del espectador conforme a una nota, dada por la obra, hace que esa alma concuerde con todas las demás en armónico acorde y, de esa forma, se potencie el todo de la vida, de la vida humana. Esa es la globalidad compleja, que siempre será, forzosamente, una armonía conflictual so pena de no evolucionar, porque los sistemas sólo producen novedad y emergencia cuando se dan los dos movimientos, a saber, el cambio y la resistencia al cambio. Por eso la *flecha del tiempo*, concepto tan afín al pensamiento prigoginiano, se encuentra en el epicentro del pensamiento complejo.

El tiempo es la *desincronía*, es decir, la falta de sincronía y de ahí que la muerte no sea lo opuesto a la vida, sino que más bien sea la vida la que se opone a la muerte, como el desequilibrio esencial, porque el equilibrio carece de historia. Hay un *ver* que es no ver más nada. Eso es la lectura, la lectura apasionada de los solitarios, porque no todo es símbolo, deseo, iconoclasmo o filosofía. Pensar es lanzarse en busca de la continuidad, de lo indiciado, del caos, de la pulsión, de la virulencia, de la vida, del presente sin fin. Somos fetichistas por naturaleza y viscosamente existimos, llenos de apegos y estofados de ignorancia. La mirada muda que se pasma ante una realidad aplastante y que comprende al observador: nada es inocuo, nada es irrelevante, nada carece de significado, de dirección, de sentido. ¿Qué sentido? ¿Qué significado? Pues bien, es precisamente ahí en donde la cuestión del *tiempo* halla su más honda justificación.

Recorriendo el álbum familiar, observando todos esos rostros, esos peinados, las ropas, los paisajes, tan “fuera de moda”, que me incluyen, que muestran la forma de estar de mi madre, de mi padre, de aquellos seres entrañables que ya no veo si no es en esas imágenes impresas, tan planas y desdibujadas, como suele ser la mente humana, que mueven al viaje sin regreso de la amnesia, me recuerdan que el vocablo latino *pagus* denota a un *país*, una comarca, el cantón, la provincia; me obliga a revisar la etimología a fondo, porque del mismo vocablo se deriva la idea de *página* y de *pagano*. Desde luego, una página es un *paisaje* que sólo es luz antes de plasmar las manchas de nuestras tintas, de nuestras obscuridades, de nuestros glifos, de nuestras inciertas y arbitrarias simbologías, sin las cuales sería imposible recordar. Sin embargo, de nuevo en el álbum familiar, es a mí, como hombre, a quien interpelan todas esas imágenes-cosas que llamo *fotografías*; me interpelan porque me amarran a una memoria en la que puedo encontrar solaz, el solaz que muy rara vez me otorga el presente.

¡Ah!, gran palabra esa de *presente*, el ojo del cuerpo del pasado, ojo que mira pero no con la luz física del mundo de las cosas, sino con otra luz, la de la memoria, de la añoranza, de la morriña, de la melancolía, de la frustración, de los éxitos siempre tan parciales y transitorios, de esas *páginas* pasadas, que son países, en las que hemos dibujado el paisaje de nuestras existencias. En verdad, cada quien es el escultor de su propia imagen. Existe en francés una expresión que resume bien el conjunto de estos sentimientos encontrados: *le mal du pays*, literalmente «el mal

del país». Esa expresión se refiere al deseo acallado por poner de nuevo los pies en una «tierra» que ya no es, en el lugar de nuestros descubrimientos, de nuestras travesuras, de nuestras esperanzas, allá en donde no veíamos los límites, en donde realmente se confundían lo ilimitado y lo indefinido; porque, a final de cuentas, qué más da si el tiempo es lineal o cíclico o, incluso, una combinación de ambos, cuando lo que sucede en el mundo, a otros hombres, casi nos da lo mismo porque no nos afecta en carne propia: somos, en general, seres muy mimados que cosechan los beneficios de las lecciones del pasado y que, probablemente, son lecciones que se han escrito con sangre, con lágrimas, con risas y oropeles, con mentiras, con amenazas y venganzas. Esto es así, ya que la gran constante que condiciona todo, absolutamente todo lo que nos incumbe, al menos eso, es la *finitud*; la implacable presencia de límites en todo: somos limitados en el cuerpo, en la existencia, en la duración, en la memoria, en las esperanzas, en la dicha, en la imaginación, en la iniciativa, en la creatividad. Si no estuviese presente eso que llamamos *naturaleza*, no haríamos nada y, de hecho, ni siquiera estaríamos aquí y ahora. No somos capaces de vivir por mucho tiempo una gran felicidad, porque hasta eso nos aburre, nos agota, nos fastidia, nos puede dejar exhaustos e incluso nos puede ir la vida en ello.

Pareciera, entonces, que el tiempo y su tratamiento, al nivel que sea, debiera ser un asunto de *pasado*, de historia, en el sentido más lato; en el límite, parecería que el tiempo fuera el negocio del antaño. Sin embargo, ¿cómo comprender ese mismo pasado, con los cambios que es posible *e-vocar*, como en las fotografías de familia? Porque esas mismas estampas fotográficas muestran la erosión de los años, amén de la sedimentación en nuestros pensamientos; ambos procesos, erosión y sedimentación, construyen la inercia en el conocimiento que, creyendo comprender, en realidad sólo se ha acostumbrado a las situaciones y a las cosas. Bien, si eso sucede en la ciencia, so pretexto de una inducción o de una causalidad en los fenómenos naturales, pueden darse consecuencias epistemológicas lamentables; pero si lo mismo acaece de cara a las personas, al cosificarlas, entonces lo lamentable es la ética. La única escapatoria para estos callejones sin salida es la de la mirada al *futuro*, esa otra dimensión esencial a la vida, no sólo como un ardid para prever lo que puede acontecer más adelante, sino para poder *pro-vocar*lo.

Bergson es quien, posiblemente, ha revisado con mayor profundidad filosófica los supuestos de la *evolución* en el sentido fuerte; la clave es la idea de una *evolución creadora*, que llega a constituir el título de su obra más emblemática. El concepto es francamente paradójico porque, en la actualidad, suele oponerse a la evolución una supuesta posición ideológica, a saber, el creacionismo. En realidad no hay nada así y quien proporciona la razón es también Bergson: su concepto de *durée* (duración) es quien moldea la realidad del mundo y le da su carácter de encontrarse imbuido en el devenir. Así, el pasado y el futuro son como dos piedras de sílex que, al chocar, liberan una chispa, la luz del presente. ¿Cómo puedo pensar en el futuro viendo mi álbum familiar de fotos? ¿Cómo despertar lo ausente a partir de lo presente desaparecido? No es el *ego* el centro del cuerpo individual, sino *mater*, porque es en los labios de aquella que nuestros labios maman en donde se escucha

la lengua; boca primordial, caverna insondable y obscuridad vivípara que emula al origen de los tiempos. El futuro es el surgimiento del pasado a partir del pasado y por eso la complejidad es el monumento más perfecto del futuro, es la promesa y la esperanza hechas estructura.

Así y todo, el *devenir* se forma en la conjunción de los tres momentos de la temporalidad, es decir, del pasado, del presente y del futuro. Es el devenir quien conforma la realidad del mundo como lo percibimos y como es *en-sí* y *para-sí*; pero también es *para-nosotros*. De ahí que tratar el tiempo filosóficamente conlleve forzosamente implicaciones de tipo epistemológico, ético, existencial, estético, fenomenológico, metafísico, lingüístico, científico; prácticamente no hay una sola región de la filosofía en la que no se trate algún aspecto del tiempo. Sin embargo, y ese es sin duda el aspecto más fascinante de este tema, la posición de los pensadores, a lo largo de la historia, está lejos de ser unánime. Ello no sólo se debe a la ingente complejidad de la cuestión, sino a la gran diversidad de posturas intelectuales posibles, henchidas todas ellas de implicaciones a todos los niveles del pensamiento y de la acción humanas. Incluso se da frecuentemente que un filósofo, no tratando explícitamente la cuestión acerca de la temporalidad, en el desarrollo de sus argumentos hay siempre suposiciones concernientes a la naturaleza del tiempo, de la historia, de la duración, del espacio, del mundo, del orden, del caos, etc. Probablemente esa sea la razón por la que se han llevado a cabo tantos estudios acerca del tiempo; ya sea desde la filosofía, desde las ciencias físicas, químicas y biológicas, desde la sociología, la economía, la historiografía, el arte (particularmente en la musicología), la psicología y las religiones. Siempre se encuentran presentes los ingredientes del sujeto, del objeto, del espacio, de la conciencia, de la percepción, de la sensibilidad, de la medida, del conocimiento, de la imaginación, por decir algunos de los más relevantes aspectos.

No obstante, permanece la problemática del lenguaje como tal, en el seno de la pregunta por la temporalidad, ya que el discurso, que emplea al lenguaje como medio, se desenvuelve en el tiempo. De esta forma, la reflexión sobre la complejidad que emana del lenguaje, y que hoy por hoy es un terreno muy activo de investigación no sólo en filosofía, es una forma de concreción bastante oportuna en nuestra colección de textos. Se manifiesta la diafanidad del complejo mundo del lenguaje, al entrever el valor vicariante de las ciencias cognitivas y que nos catapulta a nuestro punto de partida, pero con una larga reflexión de por medio. Reflexión que debería hacernos parar mientes no sólo en que el *tiempo* es una de las cuestiones más álgidas que se puedan plantear en filosofía, sino que además deja una *traza*. Esa traza, eso sí, puede tener más de una lectura: puede ser la huella que deja en su transcurrir y en su operar (el espacio); puede ser el signo de la invención, del arbitrio, el recurso evolutivo que ordena la realidad; podría restringirse a la memoria, ser un "punto", nada, la idea del sujeto, la vivencia más vehemente posible; también puede verse como la garantía del bien que el hombre aprecia más: la libertad.

Así y todo, este texto deberá contribuir a la reflexión sistemática sobre el tiempo y la complejidad que de él deriva, aun cuando haya una buena cantidad de libros,

muchos de ellos magníficos, sobre el tema. Empero, la originalidad del presente libro radica en que no solamente, como en cualquier otro, intenta arrojar nueva luz sobre las dificultades que le son inherentes, sino que lo hace en momentos en que nuestros sistemas de pensamiento, modelos sociales y económicos, paradigmas artísticos y científicos, hacen agua por todas partes y que ya no sabemos bien cómo achicar. . . Todo esto con el único fin de que, creyendo haber dilucidado algo de la maraña de complejos matices de la realidad, continuemos maravillándonos en este extraño pero, a la vez, fascinante mundo del que el hombre es una porción singular e impredecible.

Alexandre S. F. de Pomposo
Ciudad de México, 11 de octubre de 2015.

⊙ *Esta es una página en blanco.* ⊙

INTRODUCCIÓN

Complejidad creciente, rapidez en los cambios e incertidumbre

Siendo todas [las cosas] causadas y causantes, ayudadas y ayudantes, mediatas e inmediatas y siendo que todas se mantienen entre sí por un vínculo natural e insensible que une a las más alejadas y diferentes, tengo por imposible conocer las partes sin conocer el todo, así como también conocer el todo sin conocer particularmente las partes.

Blaise Pascal, *Pensamientos*.

* * *

CAOS Y COMPLEJIDAD O EL DESAFÍO DE LA RELACIÓN ENTRE CAUSAS Y EFECTOS

EN los últimos siglos, una idea recurrente en el pensamiento científico ha sido la predicción de la naturaleza por medio de leyes que pudieran aprehender y sistematizar su comportamiento. Esa forma de hacer ciencia originó una perspectiva lineal, determinista, de acuerdo con la cual conocer las condiciones iniciales de un sistema hacía posible predecir su comportamiento global; es decir, dado el conocimiento de las causas, es posible determinar completamente los efectos en el sistema.

Si bien esta perspectiva determinista fue fructífera y sobre ella se erigió el enorme avance del conocimiento generado en los últimos siglos, también es cierto que junto a esas luces, el determinismo tiene sombras no menos importantes; la principal consistió en la idealización, el reduccionismo, convirtiendo en lineal y predecible lo que no lo era para poder sistematizarlo mediante leyes. En otras palabras, se redujo la complejidad de muchos fenómenos a través de la simplificación idealizada de propiedades no sistematizables hasta llevarlas a una sencillez apta para su sistematización; así, el comportamiento de un sistema se podía predecir a partir de la suma lineal del comportamiento de las partes, derivando de esto su predecibilidad.

Sin embargo, a partir de la segunda mitad del siglo XX, quizá antes, esta situación empezó a cambiar, cuando el desarrollo de ideas, técnicas y epistemologías no lineales abrió la posibilidad de considerar los fenómenos no deterministas en sí mismos, permitiendo romper con la falsa predecibilidad.

A partir del desarrollo de esas ideas, la propiedad de impredecibilidad se ha planteado en dos sentidos, las cuales son representadas por las ciencias del caos y

de la complejidad: en primer lugar, sensibilidad extrema a las condiciones iniciales, en las que diferencias mínimas en alguna condición inicial se amplifican exponencialmente generando el caos; o, surgimiento de propiedades globales emergentes a nivel del todo con base en las interacciones entre las partes, interacciones de las que no existe rastro en cada componente individual, impulsando la complejidad. Entonces, el caos y la complejidad desafían la relación predecible entre causas y efectos, central en la ciencia clásica al igual que la visión del mundo derivada de ella.

DESAFÍOS DE LA SOCIEDAD Y NUEVOS MODELOS DE PENSAMIENTO CIENTÍFICO

Las sociedades contemporáneas enfrentan problemas de creciente complejidad, definidos por un sinnúmero de relaciones y variables que no siempre han sido interpretadas adecuadamente. Los desórdenes sociales, las turbulencias políticas, el terrorismo, el caos financiero, son expresiones utilizadas cada vez más recurrentemente por analistas y especialistas para intentar explicar el acontecer de una sociedad enfrentada a una crisis profunda que se reproduce en todos los niveles y espacios del escenario político, económico, social y cultural. En ese contexto, las tensiones, inestabilidad y turbulencias que caracterizan a los sistemas reales, han generado una crisis de credibilidad sobre la predicción y el control de esas realidades que obliga a introducir nuevos modelos de pensamiento científico.

Lo caótico, lo impredecible está presente en el universo, la naturaleza y la sociedad. En ese contexto, la teoría del caos y la complejidad, con base en principios de *no equilibrio*, de inestabilidad interna y de lo emergente, proporcionan modelos y técnicas para su estudio. Esto es así, ya que estas teorías plantean que el desorden, la turbulencia, la desorganización y lo inesperado, son aspectos constitutivos de la realidad que la investigación científica tiene que abordar y desentrañar con base en nuevas y mejores estrategias de producción de conocimientos.

La complejidad está presente en el universo, en la vida y en el pensamiento humano. Todo está en movimiento, en constante cambio. En vez de orden tenemos desorden creciente y, sin embargo, del caos surge la auto-organización, la creatividad, el diálogo, e incluso, la esperanza.

En respuesta a todo lo anterior, surgen y resurgen posiciones críticas que aspiran a influir en el pensamiento del hombre del nuevo milenio. Estas corrientes del pensamiento sugieren una comprensión del mundo más completa, donde se enfatice al todo y también a las partes. Por otro lado, se cuestiona la supremacía de la razón sobre otros aspectos humanos: se recuerda que el individuo aprende no sólo con la razón sino también con la intuición, las sensaciones, las emociones y los sentimientos.

En esencia, se reconoce que ante el nuevo escenario se requiere de la emergencia de un paradigma novedoso para la construcción del conocimiento. En este sentido, el aula puede ser un lugar privilegiado para adaptar y adecuar el proceso de formación a las exigencias de nuestro tiempo. La referencia que puede promoverse es un modo adecuado de pensamiento y reflexión para enfrentar los problemas que

son pertinentes tanto para nuestra generación como para las venideras. Se considera que el nuevo paradigma de pensamiento debe tomar en cuenta las diversas dimensiones del objeto de estudio: sus aspectos físico, biológico, cultural y social; un paradigma que reconozca la interdependencia entre los diferentes elementos, el contexto del problema, su naturaleza compleja y la incertidumbre que plantea el constante cambio.

Los instrumentos conceptuales que ofrece el paradigma racionalista tradicional –o cartesiano– y el modelo educativo derivado de éste, si bien han permitido los formidables avances de la tecnociencia del siglo XX, enfrentan hoy una crisis que puede llevar a la humanidad hacia un progreso ciego e incontrolado; esto derivado de conocimientos parcelados y reduccionistas, que se concentran en los fragmentos del objeto de estudio, artificialmente aislados, y presentan miopía ante la red de relaciones entre los fragmentos y el todo.

El paradigma cartesiano, con su fundamento en la razón, demostró su efectividad en cuanto a su capacidad para conocer y *dominar* la naturaleza, al asumir que se podía separar al conocimiento del sujeto que lo produce. Se asumió que el mundo se encuentra ordenado y que, por ello, podía conocerse si se analizaba por partes. Esto derivó en el surgimiento de múltiples y diversas disciplinas aisladas, cada una con su lenguaje y sus métodos, haciendo muy difícil, o imposible, un diálogo para construir un conocimiento más completo.

Los efectos más ilustrativos son, por una parte, la cuidadosa distinción entre las ciencias exactas (*hard sciences*) y las ciencias humanas (*soft sciences*) y, por la otra, el reduccionismo de lo biológico a lo físico y de lo humano a lo biológico. Con el fin de integrar los conocimientos aislados, las primeras propuestas reconciliadoras consideraron dos enfoques:

1. Enfoque interdisciplinario. Una forma de organización de los conocimientos en donde los métodos que han sido usados con éxito en una disciplina, se transfieren a otra.
2. Enfoque multidisciplinario. Una forma de organización de los conocimientos en donde se juntan varias disciplinas para que cada una proyecte una visión específica sobre un campo determinado.

Sin embargo, con estas propuestas sólo se rebasaban muy parcialmente las fronteras de los conocimientos disciplinarios. En estos dos enfoques surgen numerosos obstáculos para la construcción del conocimiento, que se derivan tanto de las resistencias metodológicas disciplinarias, como de las diferencias de lenguaje y de las formas de asumir las explicaciones, las descripciones y los mismos fundamentos del conocimiento. Concretamente, la principal limitación de estos dos enfoques es que, finalmente, el conocimiento vuelve a encerrarse en las disciplinas, sin considerar lo que está fuera de ellas.

Para construir el conocimiento trascendiendo radicalmente a las disciplinas, algunos pensadores y filósofos, como Basarab Nicolescu, Edgar Morin y Paulo Freire, han propuesto el enfoque multidimensional o transdisciplinario. La transdisci-

plinariedad es una forma de organización de los conocimientos que trasciende las disciplinas, ya que incluye:

- lo que está entre las disciplinas;
- lo que atraviesa a todas las disciplinas;
- lo que está más allá de las disciplinas.

Así, el enfoque multidimensional aspira a un conocimiento lo más completo posible y que, al mismo tiempo, sea capaz de dialogar con la diversidad de los saberes humanos. Entonces, se considera que el diálogo de los saberes y la complejidad deben ser inherentes a la actitud transdisciplinaria. Es importante aclarar que la transdisciplina no elimina a las disciplinas, lo que elimina es la afirmación de que una disciplina posee la verdad total. En resumen, se trata de cambiar un enfoque que separa por otro que religa.

En este libro se reúne material que aporta ejemplos muy ilustrativos de cómo en el proceso de construcción del conocimiento, tanto en lo físico, como en lo biológico y lo antro-po-social, se ha hecho necesario incluir conceptos o tecnología que antes eran ajenos a las distintas disciplinas. Así, podemos constatar que la práctica transdisciplinaria ha empezado a permear en diferentes ámbitos del conocimiento (a veces de manera inconsciente), debido a que se ha hecho necesario aprovechar los conocimientos, puntos de vista y herramientas de otras disciplinas para lograr resultados más efectivos.

Por otra parte, esta publicación no sólo pretende ser un libro de introducción a la temática de lo complejo y su tratamiento multidimensional, también aspira a ser una invitación para impulsar una nueva forma de concebir y enfrentar los problemas que nos aquejan. Por tanto, la motivación para introducir a los lectores universitarios y no universitarios en las problemáticas complejas con un enfoque multidimensional está justificada por la misión que tienen las universidades para formar profesionales de forma integral, con énfasis en la responsabilidad social y el desarrollo sostenible.

Por otro lado, el enfoque multidimensional de lo complejo es muy adecuado para lograr el posicionamiento de las universidades como modelos de referencia, en cuanto al uso de una metodología pedagógica fundamentada en cuanto al empleo de ejes de formación transversales. Ante los graves problemas que comprometen nuestro futuro como especie humana, es urgente promover una metodología que reconozca su condición compleja y la necesidad de construir el conocimiento y las soluciones a partir del diálogo entre las disciplinas e, incluso, con lo que se encuentra fuera de ellas. Por ejemplo, es imprescindible un enfoque multidimensional para el estudio de los problemas relativos a los recursos naturales, pues el uso racional de éstos es un tema complejo a la vez que estratégico para la supervivencia y el desarrollo sostenible de la humanidad y de la vida, en todas sus formas, en el planeta entero.

Por último –pero no por ello menos importante– es necesario enfatizar que toda contribución que se haga para impulsar la educación de las nuevas generaciones,

para incidir en un mejor entendimiento y tratamiento de las problemáticas pertinentes y complejas, debe soportarse sobre ejes transversales que fomenten, en todo momento, la responsabilidad social de las personas y futuros ciudadanos.

CONTENIDO DEL LIBRO

Este libro ha sido integrado con aportaciones de académicos e investigadores que en su labor cotidiana, a partir de diferentes enfoques, metodologías y herramientas, reconocen, valoran y aplican la colaboración de múltiples disciplinas en el estudio y el tratamiento de problemas complejos. Esta colaboración se justifica ante la necesidad de resolver problemas y de obtener mejores aproximaciones a los fenómenos de la vida real, inherentemente complejos, que surgen como resultado de la conformación de conglomerados formados por múltiples elementos o individuos que interactúan entre sí y que producen dinámicas emergentes de difícil predicción.

El orden en el que aparecen las aportaciones sobre el tratamiento multidimensional de lo complejo, no responde a ninguna clasificación disciplinaria, pues esto iría en contra de nuestro espíritu integrador; por eso, identificando un concepto clave en los trabajos, procedimos a agruparlos en secciones de acuerdo con un criterio temático que le diera sentido. Así, los capítulos que integran esta publicación aparecen agrupados en las siguientes secciones:

- El carácter multidimensional y transversal de lo complejo y la necesidad del trabajo colaborativo.
- Los límites del determinismo y la predicción en las ciencias duras.
- Redes y sistemas complejos: modelos y aplicaciones para abordar las interacciones en el mundo real.
- Nuevas visiones sobre la evolución: del ámbito biocultural al estudio del comportamiento gregario y genético con innovaciones computacionales.

Por supuesto, esta es una clasificación arbitraria, por lo que el lector encontrará una aparente mezcla de trabajos que provienen de colegas adscritos a distintas disciplinas (como la física, las matemáticas, las ciencias biológicas, las ciencias sociales y humanidades, y la ingeniería), sin embargo, como se puede comprobar mediante una cuidadosa lectura de los mismos, los contenidos trascienden las disciplinas de los autores a la vez que atraviesan otras.

Se considera que los contenidos de esta publicación pueden emplearse en el ámbito universitario como textos introductorios en cursos relacionados con distintas temáticas. El contenido de los capítulos de cada sección se describe brevemente a continuación.

Primera sección. El carácter multidimensional y transversal de lo complejo, y la necesidad del trabajo colaborativo

Esta sección está integrada por dos capítulos; en el primero, “Sobre lo complejo y su tratamiento multidimensional”, Gerardo Laguna presenta una breve introducción al contexto histórico del tratamiento de lo complejo y realiza un primer acercamiento a los conceptos de mayor uso entre los especialistas que trabajan en el ámbito de los sistemas complejos, tanto desde el punto de vista de la ciencia como de la filosofía. Vale la pena mencionar que la perspectiva histórica presentada incluye algunos aportes significativos de la comunidad científica mexicana para el estudio de la complejidad.

Por su parte, en el segundo y último capítulo de la sección, “La sustentabilidad y la Universidad del siglo XXI: aproximaciones al conocimiento y al trabajo colaborativo”, Octavio González desarrolla, de forma muy completa, el marco conceptual que justifica el tratamiento transversal de las problemáticas complejas, en lo general, y el de los retos para lograr una sociedad sustentable, en lo particular. En este contexto, hace énfasis en el análisis de los diferentes enfoques u orientaciones disciplinarias, tanto para la construcción del conocimiento como para abordar el trabajo colaborativo, al igual que en los retos presentes y futuros que enfrentan las universidades frente a estas problemáticas.

Segunda sección. Los límites del determinismo y la predicción en las ciencias duras

Esta sección, integrada también por dos capítulos, inicia con el ensayo “Sistemas dinámicos y caos”, en el que Lidia Jiménez nos presenta una perspectiva histórica sobre el estudio de la dinámica de los sistemas físicos, desde Aristóteles hasta Henri Poincaré, así como sobre el sorprendente descubrimiento del surgimiento de comportamientos complejos a partir de dinámicas interactivas establecidas en ciertos modelos simples y, en principio, deterministas. Así, la autora nos introduce en el ámbito de la teoría del caos que, sobre todo a partir de la década de 1990, ha venido acompañando al estudio de los sistemas complejos en el ámbito de la ciencia.

En el siguiente y último capítulo de la sección, “Gödel, el Teorema de Incompletitud y sus implicaciones en la aritmética”, Gerardo Laguna y Ricardo Barrón presentan una introducción al famoso y muy sugerente *teorema de incompletitud* de Gödel. Los autores, conscientes de la dificultad técnica que implica el desarrollo de una demostración rigurosa, optan por el desarrollo de una demostración que favorece el uso de un lenguaje asequible a un auditorio amplio, no restringido a especialistas. Su intención es acercar al lector, de una manera intuitiva, a las ideas centrales que están detrás del desarrollo original del teorema de Gödel y a sus importantes repercusiones en la ciencia moderna, sobre todo en el contexto del estudio y tratamiento de los sistemas complejos.

Tercera sección. Redes y sistemas complejos: modelos y aplicaciones para abordar las interacciones en el mundo real

Esta sección, integrada por cuatro ensayos, inicia con el trabajo: “Tejiendo redes: desde las células hasta los ecosistemas”, en el que Valeria Hernández y Cecilia González nos muestran cómo es que los sistemas complejos pueden caracterizarse y modelarse como redes, sin importar si pertenecen a la escala de lo micro o de lo macro. En particular, las autoras hacen un interesante recuento de algunas significativas aplicaciones de modelos matemáticos y computacionales, con base en redes, que son utilizadas en la ciencia de la complejidad para tratar de entender la estructura y la dinámica de los organismos vivos, sustentándose en el reconocimiento de que tanto los elementos que los constituyen como sus interacciones son piezas clave para comprender la emergencia de los fenómenos complejos.

A su vez, en el segundo capítulo de esta sección, “Luciérnagas e Internet: la magia de las redes complejas”, Ricardo Marcelín presenta una reseña sobre los conceptos más importantes de la teoría matemática de las redes, así como sobre sus aplicaciones en el estudio de la red de la vida real, entre ellas las redes sociales y la Internet. En particular, analiza el fenómeno de la sincronización y muestra, al igual que en otros ensayos que forman parte de esta publicación, cómo los científicos y tecnólogos han estudiado como punto de referencia algunos fenómenos observados en los sistemas auto-organizados de la naturaleza.

Por su parte, en el tercer ensayo de esta sección, “El vínculo que nos une: las redes vivas”, Derik Castillo nos muestra cómo es que todos los seres vivos compartimos vínculos y formamos parte de una compleja red viva que nos hace depender, directa e indirectamente, unos de otros. Con algunos ejemplos concretos, nos enseña cómo es que hasta los seres con *mala reputación* en el subconsciente colectivo tienen un papel clave en los ecosistemas de los que forman parte.

La sección concluye con el ensayo de Lidia Blásquez, “Tejiendo la red social: individuos complejos en mundos complejos”, en el que la autora nos introduce en los conceptos planteados por Bruno Latour sobre la contingencia de lo real en los fenómenos sociales y nos muestra cómo aspectos de distintos ámbitos aparentemente poco relacionados, como la ciencia y la política, en realidad forman parte de un todo entrelazado y complejo, que día a día aumenta sus dimensiones globales y sus efectos, a veces instantáneos, con base en las dinámicas impulsadas por las tecnologías de comunicación actuales.

Cuarta sección. Nuevas visiones sobre la evolución: del ámbito biocultural al estudio del comportamiento gregario y genético con innovaciones computacionales

La última sección, integrada por cinco trabajos, comienza con el ensayo “El juego de los reflejos: evolución biológica y cultural”, donde Celia Oliver y César Abarca comparten reflexiones muy sugerentes sobre los aspectos esenciales de la teoría evolutiva surgida con base en las ideas de Alfred Russel Wallace y que tomó di-

mensionaciones gigantescas en los trabajos de Charles Darwin. Estos autores nos muestran cómo la evolución biológica se amplifica y toma diferentes caminos a partir de la influencia de nuestra especie, en particular de la influencia de los valores culturales de las sociedades humanas que impactan sobre distintos rasgos biológicos.

En el siguiente ensayo de esta sección, "Panarquía en Zanbatha: una historia de los ciclos adaptativos en el Valle de la Luna", Geraldine Patrick presenta un sugerente y original trabajo de investigación referido a los fenómenos históricos surgidos alrededor del complejo sistema sociocultural, ambiental e hídrico, que han impactado el manejo y explotación de las Ciénegas del Alto Lerma desde los orígenes más remotos hasta nuestros días. Con este propósito, la autora aplica el marco teórico de los ciclos de la Panarquía, de C. S. Holling, y concluye con un escenario teórico presentado como una alternativa posible y esperanzadora, dadas las actuales y dramáticas condiciones de contaminación y desecación en las que está la cuenca del Alto Lerma.

Por otra parte, en el tercer ensayo de esta sección, "Evolución y heurísticas bioinspiradas: las nuevas herramientas de la computación", Ricardo Marcelín nos narra cómo la ciencia de la computación se ha auxiliado de técnicas de programación poco ortodoxas, partiendo de la programación de entes virtuales denominados *agentes*, para permitir que los programas emulen el comportamiento gregario de ciertos animales sociales, como las hormigas y las abejas, e incluso *evolucione* a la manera darwinista. El autor nos muestra cómo es que a estos agentes virtuales se les ha delegado la ardua tarea de encontrar soluciones aceptables (aproximadas pero nunca exactas) a problemas de gran envergadura que, de otro modo, aún las computadoras más poderosas sólo los resolverían en lapsos de dimensiones astronómicas.

A su vez, en el penúltimo ensayo de esta sección, "Evolución y algoritmos genéticos: orígenes, precursores y aplicación", Gerardo Laguna y Nareli Cruz presentan una breve introducción histórica, teórica y práctica a una de las heurísticas bioinspiradas más emblemáticas de lo que hoy se conoce como inteligencia computacional: los algoritmos genéticos. Se inicia con el relato anecdótico que llevó a John Holland a programar las computadoras para emular el proceso de evolución de las especies y su aplicación a la *evolución* de soluciones a problemas complejos. Se concluye con un ejemplo numérico de la aplicación de un algoritmo genético, con el fin de que los lectores con una formación básica de programación puedan llevarlo a la práctica.

En el último ensayo de esta sección y del libro, "Evolución de la cooperación... entre computadoras", Ricardo Marcelín nos introduce en el contexto de la teoría de juegos, así como a sus aplicaciones en el campo de la computación y las redes distribuidas. El autor parte del estudio de las estrategias en los ámbitos de la política y las ciencias sociales y nos muestra cómo la ciencia de la computación ha aprovechado estas ideas en su propio ámbito tecnológico.

MOTIVACIÓN ÚLTIMA

Podemos concluir diciendo que si bien es cierto que el estudio de lo complejo con un enfoque multidimensional ha venido tomando cada vez más relevancia, sobre todo a partir de la década de 1970 y con especial impulso en la década de 1990, no se trata estrictamente de algo nuevo ni es la panacea. En todo caso, se trata de una invitación a realizar un ejercicio de reflexión y a tomar las mejores prácticas del conocimiento disciplinario, para complementarlas con un enfoque que permita enfrentar mejor los problemas fundamentales del ser humano y, al mismo tiempo, que garantice su subsistencia como especie en armonía con la biosfera y, en general, con un uso sustentable de los recursos de la Tierra. Esto es particularmente urgente en el contexto de crisis e incertidumbre que caracterizan el inicio del siglo XXI.

En resumen, como afirma el filósofo Edgar Morin, se trata de desarrollar una noción más compleja del desarrollo, incluyendo la generación del conocimiento, que además de material, sea al menos intelectual, afectiva y espiritual. Consideramos que en el siglo XXI es necesario enseñar a vivir en unidad dentro de la diversidad: es indispensable garantizar la diversidad y evitar la homogeneización, ya que la primera es fuente de creatividad, innovación y riqueza, en suma, de vida; mientras que la segunda es un obstáculo para todo ello.

LOS COORDINADORES
UAM-Lerma, diciembre de 2015.

⊙ *Esta es una página en blanco.* ⊙

SOBRE LO COMPLEJO Y SU TRATAMIENTO MULTIDIMENSIONAL

Gerardo A. Laguna-Sánchez*

Algunos científicos buscarán y desarrollarán por ellos mismos nuevas formas de colaboración en grupos que se compondrán por miembros de virtualmente todos los campos de la ciencia. Estas nuevas formas de trabajo, debidamente soportadas por super-computadoras, durante los próximos 50 años, seguramente contribuirán de manera importante para avanzar y lograr el tratamiento de lo complejo.

Warren Weaver, 1948.

* * *

LA palabra complejo tiene su origen en la raíz latina *plectere* que se puede traducir como *tejer*, *enredar* o incluso *torcer*. De ahí se deriva la noción latina *plexus* que significa *entrelazado*. Si consideramos que el prefijo latino ‘con’ significa *junto* o *todo*, tenemos que la palabra complejo implica un *todo entrelazado* o *lo que está entrelazado junto*.

Así, la etimología de la palabra complejo respalda la definición que da para ello el filósofo Edgar Morin, al señalar que hay complejidad cuando los elementos que constituyen a un todo son inseparables y existe una red de interdependencias e interacciones entre las partes; entre las partes y el todo; entre el todo y sus partes; y entre el todo y el contexto. Hay complejidad cuando existe un tejido de elementos heterogéneos inseparablemente asociados mediante un entrelazado de eventos, acciones, interacciones, retroacciones, determinismos y azares.

En este capítulo presentamos los enfoques más representativos para concebir y tratar lo complejo.

UN PROFETA DE LA COMPLEJIDAD

En el ahora clásico artículo “Science and Complexity”, publicado en 1948 en la revista *American Scientist*, el científico estadounidense Warren Weaver (1894-1978), padre de la teoría de la información, junto con Claude Shannon (1916-2001), realizó muy interesantes declaraciones sobre el verdadero alcance de la ciencia, como él la

* Departamento de Sistemas de Información y Comunicaciones, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Lerma. / g.laguna@correo.ler.uam.mx

percibía en ese momento, pero, sobre todo, reconoció la realidad de lo complejo en los problemas de mayor importancia para la humanidad.

En dicho artículo, Weaver inició por reconocer que, en realidad, los avances en la ciencia y la tecnología logrados hasta entonces se derivaron de la solución a problemas con muy pocas variables (dos o tres), que obtuvieron los hombres de ciencia durante los siglos XVII a XIX. A estos problemas Weaver los denominó como *problemas de simplicidad*.

También reconoció que durante el siglo XX, los científicos empezaron a atacar problemas con una cantidad inmensurable de variables (miles de millones), como en el caso del estudio de los gases por la física estadística, pero resaltaba que estos estudios sólo consideraban problemas con elementos moviéndose en forma caótica y con muy poca interacción entre ellos. A estos problemas los denominó *problemas de complejidad desorganizada*.

Finalmente, identificó la existencia de cierta clase de problemas donde no sólo se involucraban muchas variables sino además con una importante interacción entre los elementos, hasta el punto de conformar un todo orgánico. A estos problemas Weaver los denominó como *problemas de complejidad organizada* y reconocía que la ciencia los había eludido hasta ese momento. En esta clasificación incluía a los seres vivos, por sí mismos, pero también a los comportamientos gregarios de los mismos. Por ejemplo, menciona desde el comportamiento de los microorganismos (células, virus) hasta el de los grupos y sociedades humanos (la economía y la política).

A pesar de denunciar el prácticamente inexistente tratamiento de los problemas que involucran lo que él denomina complejidad organizada, Weaver se declara optimista y pronostica que esta situación se vería significativamente modificada al concluir el siglo XX, siempre y cuando los investigadores decidieran colaborar en forma multidisciplinaria y se apoyaran de las herramientas computacionales que él veía surgir en ese momento.

Lo más impresionante del artículo de Weaver es su vigencia a la fecha, ya entrado el siglo XXI, ya que no obstante su optimismo, a la fecha no se ha logrado un cambio significativo ni en la forma de trabajar de la gran mayoría de los científicos, ni en el tratamiento de los problemas complejos. De hecho, los mismos temas que plantea como problemas abiertos en su artículo de 1948, y otros relacionados con lo complejo, lo siguen estando a la fecha:

- Aún no hemos terminado de conocer ni entender la física de lo muy pequeño (ondas-partículas).
- Aún no sabemos completamente cómo funcionan los muy pequeños y, al mismo tiempo, complejísimos microorganismos (células, bacterias, virus).
- Aún no podemos explicar completamente la morfogénesis de los seres vivos.
- Aún no podemos entender cómo funciona el cerebro, la mente, la conciencia.
- Aún no podemos explicar ni predecir satisfactoriamente los procesos donde participan los humanos: la economía, la política, las redes sociales.

- Aún no hemos terminado de conocer ni entender la física de lo muy grande (espacio-tiempo).

De hecho, no hay ninguna garantía de que alguna vez lleguemos a resolver satisfactoriamente todos estos problemas. Sin embargo, más allá del reconocimiento de lo complejo, el artículo de Weaver nos comparte una interesante reflexión sobre las fronteras de la ciencia, y que ahora toma mucho más sentido a la luz del pensamiento sobre lo complejo: La ciencia es una herramienta poderosa, pero no es omnipotente. Su fuerza, y a la vez su limitante, radica en que parte de lo lógico, lo observable, lo medible y lo cuantificable, pero resulta ineficaz para todo aquello que no lo es, es decir lo *alógico*, lo intangible, lo no detectable y lo incuantificable, como lo son, de hecho, muchas de las más ricas y esenciales partes de la condición humana.

Entonces, en resumen, el valor del artículo de Weaver es que introduce, en pleno siglo XX (el siglo del orden, del progreso y de los grandes inventos) la invitación a considerar el tratamiento de lo complejo desde dos perspectivas aparentemente antagónicas: la perspectiva científica y la perspectiva filosófica. Ahora daremos un breve paseo por algunos de los más representativos esfuerzos para abordar lo complejo, tanto desde el pensamiento filosófico, como del quehacer científico.

LOS DADOS DE DIOS: CAOS Y COSMOS

Podemos decir que los grandes avances en la ciencia y la tecnología, tal y como las concebimos hoy en día, son el resultado del paradigma del pensamiento occidental, conocido como racionalismo, que fue introducido en el siglo XVII por el filósofo francés René Descartes (1596-1650) en su famoso *Discurso del método*. En esencia, a fin de simplificar el estudio de todo problema, el pensamiento cartesiano asume lo siguiente:

1. Separabilidad. Es decir, que es posible descomponer al todo en partes más simples.
2. Determinismo. Que teniendo toda la información necesaria sobre el estado actual y las leyes que rigen a un objeto, es posible pronosticar su estado futuro para cualquier tiempo.
3. Claridad. Que es posible capturar la *realidad* de manera objetiva y sin ambigüedades mediante la debida observación y los pasos del método científico.

El pensamiento cartesiano implícitamente asumía al Universo como un todo organizado, es decir como un Cosmos, en contraposición al todo desorganizado o Caos.

A partir de este planteamiento, se desarticula al sujeto del objeto, la filosofía de la ciencia y, dentro de ella, se aíslan tres grandes campos: a) la física, b) la biología, y c) la ciencia del hombre y de la sociedad.

Sin lugar a dudas, el paradigma cartesiano a nivel científico permitió el impresionante avance de la ciencia y la tecnología que hoy atestiguamos y, sin embargo, finalmente durante el siglo XX, empezó a dar muestras de sus límites. Esto último, muy a pesar de las mejores intenciones de algunas de las grandes mentes del mismo siglo XX.

La crisis de la ciencia moderna comenzó a inicios del siglo XX con el surgimiento del estudio teórico y experimental de la física de lo extremadamente pequeño, lo que a la postre se denominó como mecánica cuántica. Ya el nombre de esta disciplina era, en sí mismo, una fuerte trasgresión a los supuestos asumidos en el pensamiento racionalista hasta entonces. La física clásica de Isaac Newton (1642-1727) había asumido que existía una continuidad –al ir hacia lo infinitamente pequeño– en todas las variables de la naturaleza y, no obstante, la mecánica cuántica mostraba evidencia de lo contrario.

El supuesto de claridad quedó rebasado por las evidencias experimentales que mostraban que las partículas subatómicas eran, a la vez, partículas y ondas. Peor aún, la capacidad para predecir y calcular ciertos procesos quedaba en entredicho con los estudios de Henri Poincaré (1854-1912), sobre la sensibilidad de algunos sistemas a las condiciones iniciales, y algunas teorías de la mecánica cuántica. En esta última, no se tuvo más remedio que incluir el comportamiento esencialmente aleatorio de las partículas subatómicas para poder explicar los fenómenos observados.

Todo esto orilló al famoso físico Albert Einstein (1879-1955) a expresar su consternación y escepticismo en la famosa frase: “Dios no juega a los dados”. Se refería a la aceptación por algunos colegas de las teorías cuánticas donde se reconocía la condición aleatoria de las partículas subatómicas. A partir de ello, dedicó una parte de su trabajo a proponer experimentos que pudieran demostrar que detrás de esa *aparente* falta de determinismo existía una realidad subyacente determinista. Debido a las limitaciones tecnológicas de la época, durante la vida de Einstein no se pudo realizar ninguno de los experimentos propuestos para demostrar o descartar tal realidad subyacente de las partículas subatómicas, pero, finalmente, se logró completar una serie de experimentos de este tipo en el verano de 1982 por el equipo dirigido por el científico francés Alain Aspect (1947-).

MÁS ALLÁ DE EINSTEIN

En el mundo de la mecánica clásica todo tiene su causa, pero en el mundo cuántico la causalidad directa desaparece. Aunque Einstein introdujo la noción de probabilidad en la teoría atómica, él estaba convencido de que las formulaciones probabilísticas que usaban los mecánicos cuánticos eran sólo una aproximación burda y que investigaciones posteriores determinarían con precisión el estado de una partícula en un instante dado.

Einstein, fiel a sus convicciones científicas, creía firmemente en los supuestos de realidad objetiva independiente de las observaciones y en el de causalidad de las fuerzas físicas reconocidas con estricta continuidad (localidad) espacio-temporal.

También creía firmemente en la infalibilidad de la lógica para distinguir sin ambigüedades lo verdadero de lo falso.

Sin embargo, se dice que Einstein era una persona razonable y que hubiera estado dispuesto a aceptar la evidencia experimental. Si hubiera vivido para verlo, seguramente se habría persuadido de que estaba equivocado. Los experimentos demostraron que la realidad objetiva no tiene cabida en la descripción fundamental del Universo, mientras que sí la tiene la acción a distancia o *acausalidad*, aunque todo esto nos cause un conflicto lógico al contrastar lo que es la *realidad* respecto de nuestro sentimiento de lo que la realidad debería ser.

Así, por ejemplo, el experimento de Aspect, habría obligado a Einstein a modificar su concepción de la naturaleza en un aspecto que él siempre consideró esencial: la localidad de la causalidad. Hoy podemos afirmar que la *no-separabilidad* es uno de los conceptos generales más válidos de la física.

El experimento de Aspect, a principios de la década de 1980, confirmó que las partículas que una vez estuvieron ligadas por una interacción continúan, de alguna forma, siendo parte de un único sistema y responderán conjuntamente a interacciones posteriores. En otras palabras, dichas partículas parecen formar parte de algún todo indivisible y cada una acusa lo que acontece a las restantes. Se demostró que las partículas subatómicas mantienen vínculos instantáneos independientemente de cuán separadas se encuentren, lo que implicaba una flagrante violación al supuesto de que ninguna señal puede viajar más rápido que la luz.

En resumen, los experimentos de Aspect mostraron que era necesario modificar la concepción racionalista que se tenía de la *realidad* y que, a falta de una mejor explicación, *las partículas subatómicas parecen formar parte de algún todo invisible donde cada una afecta lo que acontece a las restantes*. Las cursivas son nuestras. Vaya irrupción del concepto de complejidad en la concepción racionalista de la naturaleza por parte de la especie humana, justo en la antesala del tercer milenio de nuestra era.

Entonces comprobamos que, irónicamente, la ciencia física, que aspiraba a revelar el orden perfecto del Universo, su determinismo absoluto, su constitución a partir de materia simple (los átomos), finalmente ha tenido que reconocer la complejidad de lo real:

- Descubrió un principio irreversible de degradación y desorden (segundo principio de la termodinámica).
- Descubrió que el mundo micro-físico es complejo.

Por otro lado, en las matemáticas y la computación, Kurt Gödel (1906-1978) demostró que las matemáticas no son perfectas y Alan Turing (1912-1954) que la computación no es omnipotente.

Por su parte, en el campo de la biología se hizo evidente que la vida no es un objeto sino un fenómeno extremadamente complejo de auto-organización, interdependencia e interacción con el medio ambiente que produce autonomía.

Finalmente, es evidente la complejidad de los procesos donde interviene el hombre, es decir los fenómenos antropológicos y sociales.

ILYA PRIGOGINE Y EL ORDEN A PARTIR DEL CAOS

Ilya Prigogine (1917-2003), Premio Nobel de Química en 1977, de nacionalidad belga aunque ruso de nacimiento es, sin duda, uno de los hombres de ciencia que ha realizado muy importantes aportaciones al ámbito de la ciencia de la complejidad. Más allá de sus notables aportaciones dentro de la termodinámica y el estudio de los sistemas abiertos fuera del equilibrio, Prigogine se hizo notable por su pensamiento fresco, abierto y sugerente. Es, en definitiva, uno de los impulsores de un nuevo enfoque para la física, en particular, y para la ciencia, en lo general.

Prigogine reflexionó sobre los fenómenos de la naturaleza que pueden ser considerados como sistemas abiertos no lineales (como los sistemas biológicos y sociales, que intercambian con el entorno energía, materia e, incluso, información) y que resultan impredecibles, en contraposición a los sistemas lineales y cerrados que tradicionalmente había estudiado la física newtoniana (o mecanicista) asumiendo estabilidad, orden, uniformidad y equilibrio. En este sentido, el mayor aporte de Prigogine fue que enfocó su atención en los aspectos de la realidad que, al igual que nuestra realidad económica y social, se caracterizan por el desorden, inestabilidad, diversidad, desequilibrio y relaciones no lineales, donde pequeños cambios pueden traer enormes consecuencias.

En esencia, Prigogine sugirió que la alternativa para una ciencia más efectiva consistiría en dejar de hacer distinciones entre las ciencias duras (por ejemplo, la física y las matemáticas) y las suaves (la biología y las humanidades).

El ideal de Prigogine era aplicar las nuevas herramientas matemáticas, desarrolladas y empleadas en algunos campos de la física (por ejemplo la termodinámica), a otras disciplinas como la biología y los procesos sociales. Se trataba de religar las partes de un todo que, aunque originalmente unidas, habían sido separadas como resultado de la especialización y la parcelación del conocimiento que se derivó de la visión mecanicista y reduccionista de la ciencia. Había que unir nuevamente la física con la biología y, ¿por qué no?, las ciencias naturales y las humanidades.

El espíritu integrador de Prigogine estaba manifiesto en su personalidad y preferencias. Su gusto por la arqueología, la historia y el arte, le otorgaban un aire de erudito multifacético. En lo profesional, en Bruselas, encabezó un grupo transdisciplinario (*crossdisciplinary team*) avocado a la exploración de las implicaciones de sus ideas en campos tan disímiles como el comportamiento social de las colonias de hormigas y los procesos disipativos¹ de la mecánica cuántica, inaugurando con ello la *Escuela de Bruselas* y su moderna teoría del cambio y la dinámica.

Se trataba de dar respuesta a la aparente paradoja derivada de la segunda ley de la termodinámica, donde los sistemas físicos (y la *máquina del Universo*) están condenados a morir perdiendo energía y orden (aumentando su entropía), mientras que los sistemas vivos evolucionan volviéndose más, nunca menos, organizados.

¹ Prigogine llama *estructuras disipativas* a todo sistema (físico o químico) auto-organizado que conlleva, cada vez, a un mayor nivel organizativo y que, por lo tanto, se refiere a sistemas fuera de equilibrio que disipan energía (generan entropía). Por ejemplo, los seres vivos son estructuras disipativas fuera de equilibrio, ya que requieren la entrada de grandes cantidades de energía y disipan calor a su alrededor. Todo esto implica, en la visión de Prigogine, que el orden puede surgir del caos.

La hipótesis de Prigogine y su equipo fue, por demás, sugerente: afirmaba que, al menos en condiciones de desequilibrio, la entropía ya no produciría más desorden sino que, por el contrario, generaría orden, organización y, finalmente, vida. Con base en esta revolucionaria idea, Prigogine creía que podían finalmente coexistir la física y la biología, en vez de mantenerse en constante contradicción.

Para Prigogine, la clave se encontraba en la convivencia, y no en la confrontación, de dos conceptos tradicionalmente antagónicos: el azar y las leyes con sus determinismos o, como solía decir Jacques Monod, *el azar y la necesidad*.

NORBERT WIENER Y ARTURO ROSENBLUETH EN EL DESARROLLO DE LA CIBERNÉTICA

Dentro de la historia de la ciencia moderna, hay algunas coincidencias que son notables y sugerentes, una de ellas se conoce como el *fenómeno húngaro*. Se trata del grupo de mentes brillantes al que pertenecieron grandes científicos de ascendencia húngara y edades similares, nacidos a principios del siglo XX, como lo fueron John von Neumann (1903-1957), Leo Szilard (1898-1964), Eugene Wigner (1902-1995), Edward Teller (1908-2003), Denis Gabor (1900-1979), Paul Erdős (1913-1996), John Kemeny (1926-1992) y Peter Lax (1926-). Lo que llama la atención de este grupo de científicos, todos contemporáneos, además de ser de cepa húngara, es que muchos de ellos obtuvieron el premio Nobel y todos realizaron aportes fundamentales a la ciencia.

Curiosamente, con la figura de Arturo Rosenblueth (1900-1970), México también tuvo la oportunidad de contribuir al engrosamiento de las filas del *fenómeno húngaro*. Aunque Arturo Rosenblueth era mexicano de nacimiento, tenía sangre húngara por línea paterna y también podemos considerarlo como parte del mencionado *fenómeno húngaro*.

Arturo Rosenblueth fue una mente brillante y de gran influencia en el desarrollo de la ciencia, en lo general, y de la fisiología, en lo particular. Para empezar, la cibernética fue el resultado de una larga y estrecha colaboración entre Norbert Wiener (1894-1964) y Arturo Rosenblueth, primero en Harvard y luego en el Instituto Nacional de Cardiología de México. De hecho, Wiener y Rosenblueth, durante el periodo en que ambos trabajaban en los Estados Unidos, organizaron reuniones y seminarios interdisciplinarios sobre los sistemas complejos (tanto biológicos como de la ingeniería) y los principios que tenían en común. Ahí se gestó el inicio del estudio formal de conceptos como *retroalimentación*, *control*, *información* y *propósito* o *teleología*, todo en relación con los sistemas complejos y que, a la postre, desembocarían en el surgimiento de la cibernética.

Específicamente, queda demostrada la estrecha colaboración que tuvieron Wiener y Rosenblueth a través de la publicación de tres artículos, sobre filosofía de la ciencia, en donde aparecen como coautores y dan a conocer sus reflexiones sobre los problemas que les planteaban los sistemas complejos:

- “Behavior, purpose and teleology”, de 1943,

- “The role of models in science”, de 1945 y
- “Purposeful and non-purposefull behavior”, en 1950.

Entonces, quién mejor que Wiener para reconocer los aportes de Arturo Rosenblueth. En la introducción a su libro *Cybernetics*, Wiener apunta:

Este libro representa el producto del trabajo de más de una década, con un programa emprendido conjuntamente con el doctor Arturo Rosenblueth, antes en la Escuela de Medicina de Harvard y ahora en el Instituto Nacional de Cardiología. [...] Durante muchos años, el doctor Rosenblueth y yo, compartimos la convicción de que las áreas más fructíferas para el desarrollo de las ciencias eran aquellas que han sido descuidadas como *tierra de nadie* entre los diversos campos consagrados. El doctor Rosenblueth siempre insistió en que la exploración adecuada de estos espacios vacíos en el mapa de la ciencia, solamente puede realizarse por grupos de investigadores, cada uno especializado en su propio campo, pero con una cultura amplia en los campos de sus vecinos.

Es así como Arturo Rosenblueth a pesar de –o tal vez gracias a– haber adoptado una postura filosófica claramente materialista, realizó aportaciones importantes al campo de lo que hoy se conoce como ciencia de la complejidad. También contribuyó al desarrollo científico en México, pues no sólo fue pionero y una figura clave en el Instituto Nacional de Cardiología sino también lo fue del Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados (CINVESTAV), del que fue su primer director.

STANISLAW ULAM: UNA FUENTE DE INSPIRACIÓN

El científico estadounidense John H. Holland (1929-2015), reconocido como el padre de los algoritmos genéticos (ver el capítulo “Evolución y algoritmos genéticos: orígenes, precursores y aplicación”, p. 175), es uno de los pioneros del enfoque científico de lo que se ha denominado como sistemas complejos adaptables. Holland se ha embarcado en la empresa de modelar y reproducir mediante herramientas computacionales el comportamiento de auto-organización observado en los sistemas vivos, partiendo de un enfoque evolucionista, en el sentido darwiniano del mismo, donde los organismos logran mejorar y adaptarse al medio para sobrevivir, y cómo, mediante este proceso de adaptación, se produce la complejidad.

Sus acercamientos a la modelación por computadora de la auto-organización se observa en toda su obra, pero es en su libro *El orden oculto: De cómo la adaptación crea la complejidad* donde, después de 20 años de desarrollar sus ideas, concluye que los requisitos indispensables para un enfoque exitoso en el estudio de lo complejo son:

1. Interdisciplinarietà. El tratamiento de un mismo problema complejo compartiendo las pistas que se descubren desde la perspectiva de diferentes disciplinas.
2. Modelación por computadora. Para realizar la exploración de posibilidades con equivalentes virtuales que no sería práctico realizar con sistemas reales.

Como podemos constatar, Holland coincide en lo fundamental con las recomendaciones de Warren Weaver, no obstante que su libro aparece cerca de 50 años después de la aparición del artículo seminal "Science and Complexity".

Holland señala como científico precursor del concepto de complejidad, e inspiración para su propia obra, al matemático Stanislaw Ulam (1909-1984), también integrante del *fenómeno húngaro* y autor del famoso libro *Aventuras de un matemático*, que es reconocido por sus aportaciones en el campo de las matemáticas aplicadas y el ejercicio de la ciencia con un enfoque verdaderamente interdisciplinario. En particular, en conjunto con John von Neumann, desarrolló los autómatas celulares en la década de 1940. Años más tarde, poco después de su muerte, algunos de sus amigos científicos y colaboradores más cercanos fundarían oficialmente el *Santa Fe Institute* (Instituto Santa Fe) para el estudio de la complejidad, en Nuevo México, Estados Unidos.

El Instituto Santa Fe es reconocido internacionalmente por su actividad alrededor de la ciencia de lo complejo. En su Misión, se definen como una comunidad de investigación transdisciplinaria que aspira a expandir las fronteras del conocimiento científico, al descubrir, comprender y comunicar los principios fundamentales de los sistemas complejos (dentro de la física, la computación, la biología y la sociedad) que se encuentran detrás de los problemas más profundos que enfrenta la ciencia y la sociedad.

LA CIENCIA DE LO COMPLEJO HOY

Melanie Mitchell es una joven científica que actualmente trabaja en el Instituto Santa Fe y que recientemente publicó el libro *Complexity: A guided Tour*, donde presenta una introducción al tema de lo complejo desde la perspectiva de la ciencia, sin dejar de aspirar a la definición de elementos para cuantificar y medir la complejidad. De acuerdo con Mitchell, los sistemas complejos se pueden clasificar en dos:

1. Sistemas complejos no adaptables. Como los remolinos en el agua, los huracanes, el clima, etc.
2. Sistemas complejos adaptables. Como los organismos vivos y los grupos humanos.

De acuerdo con la misma autora, en general, los sistemas complejos se caracterizan por:

- Se componen de múltiples elementos que son más simples respecto del conjunto.
- Los elementos interactúan de alguna manera entre ellos y producen un efecto *no lineal* que se puede expresar como: «El todo es más que la suma de sus partes».
- Existe cierta auto-organización sin la presencia clara de un control central.

- Su comportamiento es impredecible más allá del muy corto plazo.

Por otro lado, los sistemas complejos adaptables incluyen, además de las características anteriores, el eventual surgimiento de los siguientes comportamientos complejos:

- Incorporación y procesamiento de información del entorno.
- Adaptación al entorno, *aprendiendo* y mejorando.

El grupo de investigadores del Instituto Santa Fe, en general, aunque no de manera unánime, mantiene una postura escéptica, de carácter eminentemente científico más que filosófico, ante la formulación de un marco teórico general para lo complejo. En este ámbito, es notable la influencia de los físicos en las definiciones de conceptos y líneas de investigación de lo que se reconoce como *ciencia de lo complejo*. Llama la atención, por ejemplo, la definición que se da en este ámbito al término *caos*. Para los físicos, el caos no es un simple y llano *desorden*, sino un "comportamiento aparentemente aleatorio con una fuerte dependencia de las condiciones iniciales". Esto nos sugiere la idea de que, pese a todo, muchos científicos aspiran a encontrar una ley detrás del aparente desorden o, como dicen algunos, encontrar el orden detrás del desorden.

Terminamos este apartado comentando que existen otros científicos que actualmente están muy activos en el ámbito de la ciencia de la complejidad. Por ejemplo, Francis Heylighen (1960-) quien desarrolla trabajos sobre evolución, complejidad y cognición, en la Universidad Libre de Bruselas; y Stuart Kauffman (1939-), en la Universidad de Calgary, como biólogo teórico y estudioso de los sistemas complejos. El lector puede remitirse a los trabajos de estos autores y sus colaboradores para tener más detalles sobre los mismos.

LA CIENCIA DE LO COMPLEJO EN MÉXICO

En México hay toda una corriente de pensamiento que, a partir de los fenómenos sociales y culturales que se observaron en nuestro país y en el mundo entero en el año de 1968, ha generado las condiciones para gestar al interior de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) un enfoque crítico hacia la ciencia. Ello dio origen, en 1973, al Programa de Ciencia y Sociedad de la Facultad de Ciencias, que incursionó de manera seria en el diálogo interdisciplinario, entre físicos, matemáticos, biólogos, economistas y sociólogos, para promover un cambio cualitativo en la forma de hacer ciencia.

Por otro lado, en el Instituto de Física de la UNAM, se creó en 1985 el Departamento de Sistemas Complejos que volcaría su atención hacia los sistemas complejos abiertos (es decir, sistemas que intercambian materia, energía e, incluso, información con el medio ambiente) que presentan caos, orden y desorden, así como sus implicaciones en los sistemas físicos, biológicos, económicos y sociales. Vale la pena mencionar que, tanto el Programa de Ciencia y Sociedad de la Facultad de Ciencias como el Departamento de Sistemas Complejos del Instituto de Física,

fueron pioneros en el estudio de lo complejo y en el empleo de un enfoque transdisciplinario. Con ello, incluso, se le adelantaron al Instituto Santa Fe de Nuevo México.

Por la misma época, en el año de 1986, se fundó el Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Humanidades de la UNAM que, luego de ampliar sus funciones en 1995, pasaría a ser el Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades (CEIICH), que es la entidad de la UNAM que se encarga de coordinar, promover y difundir, de manera institucional, los esfuerzos para desarrollar proyectos de investigación que tiendan puentes entre las disciplinas científicas, sociales y humanidades para la resolución de los problemas nacionales.

Finalmente, en noviembre de 2008, la UNAM inauguró el Centro de Ciencias de la Complejidad, conocido como C3, aunque empezó a operar de manera formal hasta el 2009. Este centro de investigación ha representado un importante esfuerzo en Latinoamérica para realizar ciencia mediante la colaboración e interacción de diferentes áreas del conocimiento. Aunque los antecedentes del C3 se encuentran en el Departamento de Sistemas Complejos del Instituto de Física, actualmente se encuentra trabajando con las principales instituciones de educación superior y de investigación del país en muy diversos temas que se agrupan, al menos, en las siguientes líneas de investigación: complejidad ecológica; complejidad social; complejidad y biología celular; e inteligencia computacional.

En estrecha relación con el C3 y sólo por mencionar un ejemplo, tenemos la figura del Dr. Germinal Cocho Gil (1933-), investigador emérito de la UNAM, hombre de ciencia a la vez que humanista, quien habiendo cursado tanto la carrera de medicina como la de física es, sin duda, una de las figuras más representativa en México en relación con el estudio de los sistemas complejos. El Dr. Cocho ha venido desempeñando, desde la creación del Departamento de Sistemas Complejos del Instituto de Física, un importante papel como investigador, docente y divulgador del enfoque transdisciplinario para el tratamiento de lo complejo. En sus propias palabras:

Soy un físico no tradicional que busca a través del análisis de los sistemas complejos responder a grandes preguntas de componente filosófico, por ejemplo ¿se puede conocer y desentrañar la información biológica de los genes?, ¿cuáles son los mensajes genéticos que permiten manejar las enfermedades?, ¿cómo aletargar el desarrollo del virus del sida?, o ¿cómo se dio el origen de la vida en el espacio interestelar?

EL PENSAMIENTO COMPLEJO: LA PROPUESTA FILOSÓFICA DE EDGAR MORIN

Existen algunos pensadores que son referentes obligados en lo referente a la filosofía de la complejidad. Entre ellos, sobresalen Paul Cilliers (1956-2011) y Edgar Morin (1921-). Aquí dedicaremos algunas líneas a la influyente obra del segundo.

Respecto de la problemática de lo complejo, el filósofo francés Edgar Morin se ha posicionado como uno de los pensadores con mayor influencia en los países de lenguas romances (francés, español, italiano y portugués) y, por lo tanto, con una

importante presencia en los círculos intelectuales de Francia, Italia e Iberoamérica.

Al concebir al paradigma como el conjunto de principios ocultos que gobiernan nuestra visión de las cosas y del mundo sin que tengamos conciencia de ello, Edgar Morin propone que para enfrentar los problemas fundamentales de la humanidad es menester transitar del paradigma dominante, con base en el pensamiento cartesiano (reduccionista y simplificador), hacia otro con base en el pensamiento complejo (incluyente y vinculante).

Así, mientras el pensamiento cartesiano simplifica lo complejo mediante: a) disyunción (que separa lo que está ligado), b) reducción (que homogeneiza lo diverso), y c) abstracción (que elimina los detalles); el pensamiento complejo distingue sin desarticular y asocia sin reducir mediante: a) distinción (que identifica a las partes), b) conjunción (que articula las partes), y c) implicación (que considera los efectos en el entorno).

De acuerdo a la propuesta de Edgar Morin, el pensamiento complejo:

1. Integra, lo más posible, los modos simplificadores de pensar, pero rechaza las consecuencias mutilantes, reduccionistas, unidimensionales y finalmente cegadoras del pensamiento simplificador.
2. Aspira al conocimiento multidimensional pero sabe, por principio, que el conocimiento completo es imposible.

Entonces, la propuesta de Edgar Morin no es holista, ya que no pretende llegar al extremo de un conocimiento abstracto de lo general; ni reduccionista, pues trata de traspasar las fronteras de un conocimiento preciso pero fragmentado.

Para lograr un conocimiento más completo, Edgar Morin propone articular lo que hasta ahora se ha mantenido como separado, siendo que debería estar unido, haciendo énfasis en que dichos conocimientos deben articularse más que acumularse, introduciendo así el concepto de *transdisciplinariedad*.

Morin justifica la importancia del cambio de paradigma, en la construcción del conocimiento, al señalar los grandes problemas del pensamiento simplificador cartesiano:

1. Idealización. Que otorga la calidad de real sólo a aquello que puede ser inteligible y expresado con claridad en una sola idea.
2. Racionalización. Que otorga la calidad de real sólo a aquello que tiene orden y coherencia dentro de un sistema.
3. Normalización. Eliminar todo aquello que sale de la norma, es decir lo excepcional.

Con ello, las consecuencias negativas del paradigma cartesiano, como pensamiento dominante, se traducen en una vida moderna que se ha definido como incondicional de la ciencia, la técnica, el progreso y el desarrollo económico, pero con una visión parcial que conduce a la muerte: la dominación desenfrenada de la naturaleza por la técnica está conduciendo a la humanidad al suicidio.

Por todo ello, Edgar Morin afirma que: “El desarrollo, concebido únicamente de manera técnico-económica, es insostenible. Es necesaria una noción más rica y compleja del desarrollo que, además de material, sea también intelectual, afectiva, moral, etc.”

En términos de Morin, la complejidad resulta de una relación dialógica entre el desorden, el orden y la organización que es, al mismo tiempo:

- Una y necesaria. Los elementos no se pueden separar.
- Complementaria. Los elementos se necesitan los unos a los otros.
- Concurrente. La relación es simultánea.
- Antagonista. Los elementos son contrarios.

Entonces, en el enfoque de Edgar Morin, la complejidad reúne en sí orden, desorden y organización y, en el seno de la organización, lo uno y lo diverso. Además, todos estos elementos se constituyen e interactúan, a la vez, como complementarios y contrarios.

Por todo ello, para pensar lo complejo, Morin propone tener en cuenta los siguientes principios:

1. Principio *dialógico*. Existen conceptos que son, a la vez, necesarios, complementarios y antagónicos. Por ejemplo, los conceptos orden y desorden.
2. Principio de *recursividad organizacional*. En un proceso complejo, los productos y efectos son, al mismo tiempo, causa de lo que los produce. Por ejemplo, el individuo y la sociedad.
3. Principio *hologramático*. Cada parte está en el todo y el todo está en cada parte. Por ejemplo, la célula y el organismo.

Si para John Holland el concepto clave detrás de la auto-organización es la *adaptación*, para Edgar Morin es la dupla *orden-desorden*. Considerando al orden como sinónimo para repetición, constancia e invariabilidad, y al desorden como sinónimo de irregularidad, desviación e incertidumbre, tenemos que:

- El orden es necesario como una base estable para la organización.
- El desorden es necesario porque posibilita la innovación, la creación y la evolución.

Incluso, Morin va más allá en la definición de los efectos *no lineales* de la complejidad. Señala que lo complejo puede tener tres diferentes manifestaciones, a saber:

1. El todo es más que la suma de sus partes. Por ejemplo, el conocimiento de las propiedades de los hilos no explica las propiedades de una tela.
2. El todo es menos que la suma de sus partes. Por ejemplo, el conocimiento de las propiedades de una tela no explica las propiedades de los hilos.

3. El todo es más y, al mismo tiempo, menos que la suma de sus partes. Las dos afirmaciones anteriores son ciertas respecto del mismo objeto.

También va más allá en la concepción de las diferentes posibilidades de causa-efecto presentes en lo complejo:

- Causalidad lineal. Una cosa produce a otra.
- Causalidad retroactiva. Una parte de lo que se produce se retroalimenta como causa.
- Causalidad recursiva. El producto produce lo que lo produce.

Pero, lo más importante en las reflexiones sobre el pensamiento complejo de Edgar Morin, más allá del muy estimulante ejercicio intelectual, es que propone aplicar este enfoque para cambiar la situación que puede llevar a la humanidad a su propio exterminio. La hiper-especialización produce un debilitamiento de la percepción de lo global que conduce al debilitamiento de la responsabilidad (cada persona tiende a responsabilizarse únicamente de su tarea especializada) y al debilitamiento de la solidaridad (nadie siente vínculos con sus conciudadanos).

Para gestar el cambio en esta situación, Edgar Morin propone una reforma de la educación, incorporando en las aulas el tratamiento de lo complejo con un alto sentido humanista, tal y como lo expresa muy concisamente en su libro *Los siete saberes necesarios para la educación del futuro*, donde afirma que es necesario enseñar:

1. El riesgo de error y la ilusión en la construcción del conocimiento. Para reconocer las limitaciones y real alcance de nuestro conocimiento científico.
2. Los principios de un conocimiento pertinente. Para reconocer los problemas clave para la humanidad y la información importante para ello.
3. La condición humana. El reconocimiento de la condición compleja del ser humano.
4. Nuestra interdependencia planetaria. Para reconocer nuestra unidad en la diversidad; para cohabitar con todos los seres vivos en la misma biosfera; para ser solidarios con nuestros congéneres; para tener una postura crítica y autocrítica.
5. Cómo enfrentar la incertidumbre. En este mundo cambiante se hace necesario ser flexible, adaptable y contar con una estrategia.
6. La comprensión como requisito para la comunicación. La comunicación que implica comprensión garantiza la solidaridad de la humanidad.
7. Una ética dada nuestra condición humana. Reconocer que el ideal complejo «Libertad, Igualdad, Fraternidad» comporta conceptos complementarios y, al mismo tiempo, antagónicos.

Para terminar, no hay mejor síntesis de la aspiración del pensamiento complejo que la que hace el mismo Edgar Morin. En sus propias palabras:

El pensamiento complejo integra, lo más posible, los modos simplificadores de pensar, pero rechaza las consecuencias mutilantes, reduccionistas, unidimensionales y finalmente cegadoras de una simplificación que se toma por reflejo de aquello que hubiere de real en la realidad ... [se] aspira al conocimiento multidimensional, pero sabiendo, desde el comienzo, que el conocimiento completo es imposible.

RETO Y DIVERTIMIENTO

Para cerrar este capítulo introductorio, podemos sugerir al lector que tome nota de los siguientes conceptos, para que los identifique conforme se vayan presentando en los capítulos que siguen. Este ejercicio es interesante porque todos estos conceptos aparecerán bajo muy diversas formas y el reto es, precisamente, encontrar dónde y bajo qué forma se presentan:

- elementos simples o individuos
- interacciones o redes
- incertidumbre, imprevisibilidad o azar
- interdisciplina, mutidisciplina y transdisciplina
- modelos y computación.

BIBLIOGRAFÍA

- Ball, Philip. 2010. *Masa Crítica. Cambio, caos y complejidad*. México: Turner-Fondo de Cultura Económica.
- Cocho, Germinal. 1999. "Sobre la contribución de Prigogine, Haken, Atlan y el Instituto de Santa Fe al estudio de la dinámica de los sistemas complejos". En Ramírez, Santiago (coord.), *Perspectivas en las teorías de sistemas*. México: Siglo XXI-CEIICH, UNAM, 45-50.
- Gribbin, John. 1986. *En busca del gato de Schrödinger*. Biblioteca Científica Salvat.
- Holland, John H. 2004. *El orden oculto: De cómo la adaptación crea la complejidad*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Martínez-Mekler, Gustavo y Germinal Cocho. 1998. "Al borde del milenio: Caos, crisis, complejidad". En De la Peña, Luis (coord.), *Ciencias de la materia: Génesis y evolución de sus conceptos fundamentales*. Siglo XXI-CEIICH, UNAM, 265-299.
- Mitchell, Melanie. 2011. *Complexity: A Guided Tour*. Oxford University Press.
- Monod, Jacques. 2002. *El azar y la necesidad*. Tusquets.
- Morin, Edgar. 1999. *Los siete saberes necesarios para la educación del futuro*. Santillana-UNESCO.
- Morin, Edgar. 2000. *Introducción al pensamiento complejo*. Gedisa.
- Prigogine, Ilya. 1984. *Order out of chaos: Man's new dialogue with nature*. Bantam Books.
- Sheldrake, Rupert. 2014. *El espejismo de la ciencia*. Kairos.
- Weaver, Warren. 1948. "Science and complexity". *American Scientist*, 36:536-544.

SUSTENTABILIDAD Y LA UNIVERSIDAD DEL SIGLO XXI: APROXIMACIONES AL CONOCIMIENTO Y AL TRABAJO COLABORATIVO

*Octavio Francisco González-Castillo**

La razón nace naturalmente escindida, es social y culturalmente como logramos unificarla.

Bernardo Bolaños, "Más acá y más allá de las disciplinas".

★ ★ ★

LA sustentabilidad como paradigma emergente enfrenta a la humanidad a la necesidad de rediseñar sus modelos de desarrollo, de tal manera que le permitan establecer una nueva relación de estabilidad, bajo pautas de equidad intra e intergeneracional, en los socioecosistemas y los sistemas antropoambientales.

La emergencia y desarrollo de las diferentes orientaciones disciplinarias parece seguir una dinámica similar a los paradigmas de Thomas Kuhn, es decir, cada nueva orientación emergente (nuevo paradigma) parece superar de manera inclusiva a aquella vieja orientación que le precede (viejo paradigma), es decir, que si bien cada nueva orientación disciplinar supera las limitaciones mostradas por la que le precede, no elimina a esta última, más bien la incluye como caso particular que con ciertas restricciones y consideraciones aún tiene cabida dentro de la orientación emergente.

En el presente trabajo se caracteriza a los enfoques disciplinar, multidisciplinar, interdisciplinar y transdisciplinar y se contrastan sus alcances y limitaciones como plataformas de investigación, reflexión e intervención, frente al reto que nos plantea el paradigma de la sustentabilidad.

Al final del capítulo se presenta también una reflexión en torno a los retos y oportunidades que el trabajo «más allá de la disciplina» representa para las universidades y centros de investigación y desarrollo.

LA NECESIDAD DE RELIGAR

La evolución de los sistemas naturales no está separada del desarrollo de los sistemas humanos, ambos están en continua interacción. Entre ellos se establecen

* Departamento de Biotecnología, División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. / ogc@xanum.uam.mx

múltiples flujos de materia, energía e información y, de hecho, se encuentran en un proceso de continua coevolución. Sin embargo, el hecho de que tradicionalmente los sistemas humanos y su dinámica de *desarrollo* hayan sido un campo de estudio casi exclusivo de las disciplinas sociales, al tiempo que el estudio de los sistemas naturales y su dinámica de *evolución* han sido abordados casi exclusivamente por las disciplinas naturales, resulta en que hoy en día domine en nuestras mentes una visión fragmentada, en la que ambos sistemas se encuentran disociados. Este fenómeno alcanza un sentido más profundo en los investigadores que hemos sido formados bajo una matriz departamental especializante.

No es posible negar hoy en día los beneficios de la especialización, sin embargo, tampoco sería prudente negar sus limitaciones intrínsecas y dejar de enfrentar los retos y oportunidades que trae consigo la necesidad de construir una visión en la que los socioecosistemas y los sistemas antropoambientales sean reintegrados en nuestras mentes. Esto requerirá complementar al enfoque disciplinar con enfoque más incluyentes y contextualizantes capaces de construir puentes conceptuales y de comunicación entre ambos campos, posibilitando así el trabajo conjunto y sinérgico de sus investigadores hacia la integración de marcos paradigmáticos y un lenguaje pertinente a los socioecosistemas y los sistemas antropoambientales sustentables.

REDUCCIONISMO Y ESPECIALIZACIÓN DISCIPLINAR: LOGROS Y LIMITACIONES

El mundo, afirma Checkland, es un complejo gigantesco con conexiones densas entre sus componentes. Debido a nuestra limitada capacidad para examinarlo en toda su complejidad, solemos dividir el *todo* en *partes*, para luego analizar a cada una de éstas por separado. Con base en esta estrategia de reducir la complejidad inherente al mundo (perspectiva atomista-reduccionista), el ser humano logró generar tal cúmulo de conocimientos que al paso del tiempo fue necesario realizar un esfuerzo complementario para organizarlo. Esta búsqueda de regularidad y orden, probablemente, se convirtió en una de las motivaciones que dieron origen a la Universidad, poderosa institución consagrada a la generación, sistematización, enseñanza y difusión del conocimiento.

Con el tiempo, la Universidad no sólo logró organizar el conocimiento, sino que con base en la lógica implícita en los «campos disciplinarios» para ello definidos, organizó también su propio quehacer institucional. Fue así como emergieron y se consolidaron las estructuras (divisiones, facultades, departamentos, áreas, etc.) y procesos (planes, programas, proyectos, presupuestos) parcelados que aún hoy en día rigen y conducen la dinámica universitaria.

La poderosa influencia que la institución universitaria ejerce sobre la sociedad, condicionó que el modelo basado en disciplinas fuera transferido y se extendiera por todo el ámbito laboral dando lugar a profesiones, asociaciones, revistas, reuniones, etc., también de carácter disciplinario. Fue así como el principio del reduccionismo –y su estructura disciplinaria derivada– han permeado profundamente nuestro pensamiento en los últimos cuatro siglos. La idea está profunda-

mente arraigada no sólo en los científicos, sino en cualquier persona que tenga una cultura occidental, y ha sido la base para el desarrollo de la mayor parte de la ciencia, así como la responsable de avances sorprendentes y revolucionarios en todos los campos del conocimiento humano.

De esta manera, la estructura disciplinaria ha resultado tan útil, y ha sido reforzada con tanta insistencia a lo largo del prolongado proceso educativo, que hoy en día resulta fácil olvidar que las divisiones que aquellas proponen son arbitrarias. Nos hemos acostumbrado tanto a esta forma fragmentada de aproximar la realidad que hoy en día se nos dificulta reconocer la natural unidad que subyace en ésta.

Si bien resulta innegable el papel destacado que la ciencia y, sobre todo, la tecnología han tenido para elevar el nivel de desarrollo del ser humano, resultaría riesgoso no querer ver que, a su vez, han traído aparejadas un considerable grado de deterioro de los socioecosistemas de los cuales formamos parte. Así, al tiempo que la ciencia y la tecnología han proporcionado tecno-soluciones para satisfacer las numerosas y siempre crecientes necesidades humanas, también han derivado en nuevos y numerosos problemas que se han conjuntado hasta alcanzar la crisis civilizatoria (ambiental y social) que se ha caracterizado en nuestros días como la *sociedad del riesgo*.

Al respecto, Felipe Ochoa dice:

a medida que, por una parte, la complejidad de los sistemas creados por el hombre continua aceleradamente, por otra, se observa que las disciplinas de la ciencia y el instrumental de las profesiones se especializan cada vez más.

Ya desde 1973 Russell Ackoff afirmaba que los objetos de estudio de las ciencias y las humanidades pueden ser abordados individualmente pero nunca pueden, en la realidad, ser separados. Las disciplinas, afirma, representan categorías útiles para clasificar el contenido de las ciencias, pero nos recuerda que la naturaleza no está organizada de la misma forma que nuestra mente. Concluye que para enfrentar problemáticas como el deterioro ambiental, las guerras, etc., se deberá asumir una visión holista, utilizar una aproximación de sistemas y una orientación más allá del trabajo disciplinar.

Por su parte, Mario Casanueva y Diego Méndez afirman:

un numeroso grupo de intelectuales considera que la organización disciplinar actual del conocimiento, está en estado de crisis... Vivimos una época de nuevos y profundos cambios y desafíos de dimensiones planetarias, ahora, como nunca antes, se plantean problemas que rebasan el ámbito de aplicación de disciplinas particulares.

K. Wilbert también ha afirmado que:

el reduccionismo ha resultado en una visión fracturada del mundo... de manera drástica ha disociado la mente del cuerpo, lo subjetivo de lo objetivo, la cultura de la naturaleza, el pensamiento de los objetos del pensamiento, los valores de los hechos, el espíritu de la materia, lo humano de lo no humano.

Un dualismo tal, en conjunción con un reduccionismo llevado al extremo, han terminado por condicionar nuestros procesos mentales de manera tal que difícilmen-

te perciben, dan cuenta y consideran la complejidad implícita en la red de conexiones e interdependencias de los socioecosistemas.

Para algunos otros autores, lejos de avanzar hacia la toma de conciencia y acciones pertinentes para enfrentar la crisis, la humanidad está siendo arrastrada por una suerte de inercia que la lleva a ahondar en las causas de la misma. León Olivé afirma que:

en las últimas décadas del siglo XX irrumpieron nuevas prácticas tecnocientíficas (TIC, biotecnología, nuevos materiales, nanotecnología, etc.). . . [las que conllevan]. . . cambios profundos en la forma de generar, transmitir, apropiarse y aplicar el conocimiento, con enormes consecuencias sociales, económicas y culturales. . . muy pronto la convergencia bio-nano-cogno, dejará en la periferia de la economía a las industrias transformadoras de materias primas. . .

Si hoy resulta ser una aspiración válida transformarse en una sociedad sustentable, deberemos reintegrar en nuestras mentes a los sistemas humanos y naturales. Dada la naturaleza compleja de las relaciones entre ambos sistemas, esto requerirá complementar nuestra perspectiva reduccionista con una perspectiva expansionista que explique los fenómenos en su totalidad y no en partes aisladas, al tiempo que considere el contexto y sus interacciones.

Cuenta de ello nos la dan Clayton y Radcliffe, en su libro *Sustainability: a systems approach*:

El mundo puede ser pensado como un gran sistema complejo, el cual contiene subsistemas, como los socio-económicos y ambientales, que son en sí mismos complejos y que establecen entre sí un patrón de interacción aún más complejo. Es improbable que modelos simples sean capaces de capturar este comportamiento. . . Los problemas del desarrollo son típicamente multidimensionales, multidisciplinarios y multisectoriales. . . El entendimiento de las ramificaciones complejas de la sustentabilidad requiere la integración de información de un rango amplio de disciplinas. . . La tarea vital es encontrar la forma de integrar las dimensiones críticas del debate, para recoger o producir la información y perspectivas esenciales en lo científico, socio-económico y filosófico para desarrollar una estrategia racional. . . que pueda generar políticas prácticas y efectivas. . .

A este respecto, Mario Casanueva y Diego Méndez anotan:

El concepto de transdisciplina. . . parece ser una enérgica reacción contra la especialización de las ciencias naturales y humanas ocurrida durante la sociedad industrial seguida de su hiper-especialización durante la segunda mitad del siglo XX. . . surge asociado a la idea de que la resolución de problemas propios de la sociedad del siglo XXI, algunos de ellos inéditos, requiere de conocimientos que actualmente no se circunscriben bajo una sola disciplina. La sociedad del siglo XXI, llámese como se llame (del conocimiento, de la globalización, de la tecnociencia, de la información, etc.), se caracteriza(rá) justamente por el uso intensivo de conocimientos muy diversos para la resolución de problemas. En numerosos contextos existe la esperanza de que la disolución de fronteras conceptuales propias de las disciplinas, a favor de un enfoque transdisciplinario, permitirá afrontar los retos que nos aguardan. . .

Si bien este relativamente nuevo modo de investigar (que Michael Gibbons y coautores lo llaman «modo 2») también es capaz de generar conocimiento para aproximar la realidad, éste se encuentra más bien motivado ya sea por la necesidad (en ocasiones urgente) de atender problemáticas complejas que suceden en el mundo real y que nos afectan o amenazan; o más bien motivado –en la lógica económica neoliberal– por generar y aprovechar una ventaja que otorgue una posición ventajosa para competir en el mundo globalizado.

MÁS ALLÁ DE LA DISCIPLINA

Pero, ¿de qué se trata este nuevo modo de investigar? Bengt Hansson, en su artículo “Interdisciplinarity: for what purpose?”, propone que el reto no es tanto reflexionar sobre la naturaleza de trabajo disciplinario, sino sobre la naturaleza de los problemas que son abordados por aquél. Identifica a la multidisciplinaria con la «cooperación» pertinente en proyectos de corto plazo en los cuales, con base en el entendimiento y herramientas disponibles, es posible definir y estructurar con precisión los problemas; a la interdisciplina con la «fertilización cruzada», adecuada en proyectos de largo plazo en los cuales aún no se cuenta con el entendimiento y las herramientas que permitan el tratamiento multidisciplinario.

Por su parte, Anders Karlqvist, en su artículo “Going beyond disciplines: The meanings of interdisciplinarity”, define cinco tipos de trabajos disciplinarios: a) hacer la misma tarea de manera diferente, b) hacer diferentes tareas que más tarde deberán juntarse (lo identifica con la multidisciplinaria), c) hacer diferentes tareas que sólo pueden ser combinadas a través de marcos adicionales, d) hacer cosas diferentes y, e) pensar diferente. El rasgo distintivo entre todos ellos es la conducción intelectual del trabajo. Resulta fundamental estar siempre atento para adaptar el proceso y la organización de acuerdo con la naturaleza cambiante de los problemas.

Una preocupación común entre los autores de la creciente literatura sobre el tema es la falta de consenso en torno a una definición precisa sobre el significado de los múltiples vocablos (por ejemplo, mono, multi, poli, inter, trans, meta, etc.) que se han propuesto para nombrar a las distintas orientaciones disciplinares. Al respecto Álvaro Peláez comenta:

Como suele suceder en muchos otros dominios del discurso, el uso difundido de un término o familia de términos no siempre viene acompañado de claridad y univocidad semántica y el caso con el uso de *transdisciplina* no es la excepción.

Son múltiples y variados los criterios que se han utilizados para ordenar el campo semántico de la *orientación disciplinar*, por ejemplo: número de disciplinas involucradas, nivel de interacción alcanzado entre éstas, motivaciones para el trabajo colaborativo, alcance en la participación de los grupos de interés, quién controla el proceso, impacto sobre la integridad de las fronteras entre disciplinas, etc.

En este trabajo se retoma la propuesta que autores como Mario Casanueva y Diego Méndez hacen para, en una primera aproximación, dividir las interpretaciones en: a) aquellas que asumen que la *orientación disciplinar* se refiere a una carac-

terística intrínseca al conocimiento (visto como producto de un proceso cognoscitivo) y b) aquellas que consideran que la *orientación disciplinar* se refiere a una característica intrínseca a la dinámica de pensamiento o trabajo colaborativo (vistos como procesos seguidos, ya sea en la generación de un conocimiento o en la resolución de un problema).

Si bien, para los fines propuestos en este trabajo, resulta más pertinente la segunda interpretación, en aras de un desarrollo conceptual más completo, a continuación se desarrollan ambas posturas y se ofrece una caracterización de las diferentes *orientaciones disciplinares* que se derivan.

ORIENTACIÓN DISCIPLINAR DEL CONOCIMIENTO

En esta primera interpretación sobre la *orientación disciplinar*, se asume a ésta como una característica intrínseca al conocimiento, razón por la cual se comenzará por ofrecer una reflexión sobre la naturaleza misma de lo que comúnmente denominamos *conocimiento* para, luego, dar paso a la caracterización de las diferentes *orientaciones disciplinares* en el mundo conceptual.

Podemos empezar diciendo que un conocimiento representa la unidad funcional mínima del pensamiento individual nacido de la investigación cognoscitiva; es un conjunto de enunciados (constructos, definiciones y proposiciones) con función representativa de alguna parte del mundo real. Cuando un conocimiento es comprobado públicamente pasa a ser reconocido como teoría.

Atendiendo a su orientación disciplinar el conocimiento puede ser clasificado de acuerdo con los siguientes tipos:

- **Conocimiento disciplinar.** Este tipo de conocimiento se caracteriza por estar enmarcado dentro de los límites definidos para una disciplina o región disciplinar dentro del espacio conceptual. Parafraseando a Mario Casanueva y Diego Méndez, se podría afirmar que las disciplinas deben concebirse como idealmente disjuntas: “desde un punto de vista epistemológico, suele considerarse... [que las disciplinas] no comparte[n] elementos y, tomadas conjuntamente, agotan el conocimiento”.

De esta manera, y de acuerdo a la estructura disciplinaria dominante, la humanidad cuenta hoy en día con un gran acervo de conocimientos científicos organizado en disciplinas como lo son la física, la química, la biología, la antropología, la economía y la politología, sólo por mencionar algunas de las más conocidas.

- **Conocimiento poli y multidisciplinar.** En este caso el conocimiento se conforma al agregar enunciados provenientes de, al menos, dos disciplinas diferentes. Muchas veces este tipo de conocimiento es el producto del trabajo de equipos que, bajo una dinámica poli o multidisciplinaria, abordan algún problema asociado al desempeño de sistemas relativamente *sencillos* (ver figuras 1 y 2, así como los textos que las acompañan). Cabe resaltar que, en el caso de la polidisciplina, el sentido de integración se limita a la noción de agregación

simple y directa de conocimientos generados de manera independiente por profesionales adscritos a diferentes ámbitos disciplinarios.

En este punto conviene aclarar que para este trabajo el conocimiento multidisciplinar (multidisciplina) es un caso particular en el que la polidisciplina es llevada al extremo de requerir la participación de muchas disciplinas.

- Conocimiento interdisciplinar. Si bien en la interdisciplina también se requiere de la integración de enunciados de al menos dos disciplinas diferentes, en este caso el sentido de integración va más allá que en el caso de la polidisciplina, siendo ahora un requisito necesario el que los enunciados sean entretreídos a partir de la colaboración entre profesionales –o al menos sus perspectivas– adscritos a diferentes ámbitos disciplinarios. De esta manera, el requisito cuantitativo de contar con la participación de más de una disciplina es un requisito suficiente en cantidad, más no satisfactorio en calidad para lograr la interdisciplina.

De esta manera, para Anders Karlqvist, el conocimiento interdisciplinario surge de manera natural cuando lo que se busca es conectar distintas disciplinas a través de un significado emergente que no es proporcionado por ninguna de éstas en lo individual. Por su parte, Elke Köppen y coautores consideran que la interdisciplina conlleva un trasvase de fronteras disciplinarias, sin que las ramas actuantes pierdan su identidad.

Cabe señalar que, usualmente, este tipo de conocimiento emerge del trabajo de equipos colaborativos que abordan algún problema asociado al desempeño de sistemas *complejos* (ver figuras 1 y 2).

- Conocimiento transdisciplinar. Si bien el conocimiento transdisciplinar mantendrá varios atributos escalados por el conocimiento interdisciplinar, aspira a ir más allá y rebasar los límites impuestos por las fronteras disciplinarias, llegando generalmente a cuestionar no sólo la validez de dichas fronteras, sino también la imposición de criterios académicos como única pauta para determinar la pertinencia de un conocimiento dado.

De acuerdo con Basarab Nicolescu, Jean Piaget fue el primero en acuñar el término *transdisciplinariedad*. Es el propio Nicolescu quien ofrece, en el libro *Manifiesto de la transdisciplinariedad*, una definición que sigue tres tesis:

1. Existen, en la naturaleza y en nuestro conocimiento de la naturaleza, diferentes niveles de realidad (macro, microfísico y ciber/espacio/tiempo) y, por correspondencia, diferentes niveles de percepción.
2. El paso desde un nivel de realidad a otro es asegurado por la lógica del *tercero incluido*.¹

¹ De acuerdo con Edgar Morin, la lógica del tercero incluido o lógica de la inclusión, es una lógica de la complejidad que busca incorporar al *tercero excluido*, característico de la lógica clásica, en un nivel de realidad incluyente en el cual coexisten los contradictorios.

3. La estructura de la totalidad de los niveles de realidad y la percepción es una estructura compleja: todo nivel es lo que es debido a que todos los niveles existen al mismo tiempo.

De acuerdo al análisis de Verusca Moss y Antonio Passos, lo que Nicolescu ha intentado mostrar es que el desarrollo de un punto de vista transdisciplinario puede ayudar en la tarea de aprehender tres clases de significado:

1. *Significado horizontal*, es decir, las interconexiones en un nivel simple de realidad. Esto es lo que hacen la mayoría de las disciplinas académicas;
2. *Significado vertical*, es decir, las interconexiones que envuelven diversos niveles de realidad. Esto es lo que hacen la poesía, el arte o la física cuántica; y
3. *Significado del significado*, es decir, las interconexiones que envuelven toda la realidad: el sujeto, el objeto y el término de la interacción.

Este tipo de conocimiento suele emerger como un resultado (ya sea buscado o colateral) en proyectos empíricos orientados hacia el estudio y resolución de problemáticas complejas, en los que adicionalmente se cuenta con una importante participación –y aun, en ocasiones, control– por parte de los actores que directamente sufren las consecuencias de la problemática en cuestión.

La crítica más común a la orientación transdisciplinar del conocimiento se centra en cuestionar la aspiración que ésta tiene para alcanzar la *unicidad del conocimiento*, misma que se asocia con una versión monolítica del conocimiento científico. En palabras de Rodolfo Suárez:

[nos hemos visto obligados a] buscar estructuras conceptuales ominicomprendivas, que den cabida a mirar lo *mismo* sólo que desde puntos de vista diferentes... e, incluso, trascender estas perspectivas en la búsqueda de una aproximación que las englobe. El problema, por supuesto, radica en la justificación de la hipótesis de que esta sumatoria es posible, e incluso, deseable... lo que está en el centro de este señalamiento es la noción de inconmensurabilidad y las dificultades de que a partir de ella se derivarían con respecto a la posibilidad de gestar estructuras conceptuales efectivamente transdisciplinarias...

Hasta aquí la caracterización de las distintas orientaciones disciplinares cuando las asociamos como características intrínsecas al conocimiento en sí mismo. La siguiente sección abordará la caracterización correspondiente cuando asociamos las orientaciones disciplinares a la dinámica que se sigue al proceso de investigación cognoscitiva que produce el conocimiento.

ORIENTACIÓN DISCIPLINAR DE LA DINÁMICA DE TRABAJO

En esta segunda interpretación de la *orientación disciplinar*, se asume a esta como una característica intrínseca a la dinámica del trabajo colaborativo. En palabras de Mario Casanueva y Diego Méndez:

tal clasificación... no pone el acento en la arquitectura conceptual del producto... sino en como se ejecuta un proyecto de investigación que reúne a varios participantes de distintas orientaciones profesionales.

En ese mismo contexto, Rodolfo Suárez comenta que en este caso la actividad de investigación se orienta, más que a la cabal comprensión de la naturaleza y su complejidad, a la resolución de problemas socialmente relevantes. De acuerdo al mismo autor, la definición no necesariamente desestima ni la posibilidad ni la importancia de construir unidades cognitivas que trasciendan los ámbitos disciplinares, pero el acento pragmático que le caracteriza pone en primer plano a las estrategias y estilos de investigación.

En este caso, el énfasis está en los problemas. De acuerdo con Bengt Hansson, se parte de la premisa de que los métodos de trabajo se deben adaptar a los requerimientos de aquellas situaciones que se busca atender o de aquellos problemas que se pretende resolver, y no a la inversa. La elección de una orientación disciplinar para el trabajo debe ser consistente con este principio.



Figura 1: Pirámide de las situaciones/problema.

Son cuatro los tipos de problemas pertinentes para esta reflexión, mismos que se ilustran en la figura 1 y se describen a continuación:

- Situaciones/problema asociados al estudio de fenómenos aislados. En este tipo de problemas, bajo condiciones controladas, se aísla de la realidad al fenómeno a ser estudiado. Así, este es descontextualizado y analizado me-

diante un experimento en el que se eliminan, al máximo posible, las interacciones tanto con otros fenómenos relacionados como con su entorno. Frente a estos problemas, la motivación más usual para el trabajo suele ser la curiosidad y el anhelo por poseer el conocimiento en el campo disciplinario en cuestión.

- Situaciones/problema asociados al desempeño de sistemas *sencillos*. En este y los subsiguientes tipos de situación/problema, se asume que estos existen en la realidad cotidiana. De hecho, en el mundo real, se suelen enfrentar problemáticas más que problemas. Las problemáticas han sido definidas por Russell Ackoff como un conjunto de problemas interrelacionados. La característica de *sencillos* se refiere al hecho de que el número y grado de complejidad de las interacciones que se dan entre las partes (subsistemas), el todo (sistema) y su entorno (suprasistema) son mínimas o prácticamente nulas. En tal caso, los fenómenos estudiados se comportan como si fuesen independientes entre sí, y se podría esperar que *el comportamiento del todo sea igual a la suma de comportamientos de sus partes*.

Frente a estas situaciones/problema la motivación para el trabajo suele ser, o bien la curiosidad y anhelo por poseer el conocimiento sobre el desempeño de los sistemas sencillos, o bien la insaciable necesidad de intervenir la realidad para aumentar así el nivel de desarrollo personal u organizacional.

- Situaciones/problema asociados al desempeño de sistemas *complejos*. La característica de *complejos* se refiere al hecho de que el número y grado de complejidad de las interacciones que se dan entre las partes (subsistemas) dentro del todo (sistema) son elevados. Por otro lado, en estos casos el entorno es considerado sólo como una externalidad que influye en el comportamiento del sistema. De esta manera, los fenómenos estudiados se comportan como si fueran dependientes entre sí, y podríamos esperar que *el comportamiento del todo sea algo más que la suma del comportamiento de sus partes*.

Frente a estos problemas las motivaciones para el trabajo serán las mismas que para el caso anterior, pero ahora asociadas al desempeño de sistemas complejos.

- Situaciones/problema asociados al impacto acumulativo (temporal/espacial) sobre el *entorno*. En este caso la característica de *complejos* se extiende para incluir no sólo las numerosas y complicadas interacciones que se dan entre las partes (subsistemas) dentro del todo (sistema), sino también aquellas que se establecen entre este último y su entorno (suprasistema). El suprasistema adquiere así una relevancia particular ya que no sólo influirá el comportamiento del sistema sino que, en cierta manera, lo normará al ubicarse como el sistema mayor al que el desempeño del sistema mismo afecta o, aún más, debe servir. Una vez más los fenómenos estudiados se comportan como si fueran dependientes entre sí y podríamos esperar que *el comportamiento del todo sea más que la suma del comportamiento de sus partes*.

Frente a estos problemas las motivaciones para el trabajo, a corto plazo, serán las mismas que para el caso anterior, pero ahora se verán extendidas para incluir, en el largo plazo, el conocimiento y desarrollo del suprasistema.

En este trabajo se sostiene que serán los cuatro tipos de situaciones/problema descritos los que determinen, respectivamente, el ámbito de pertinencia para las distintas *orientaciones disciplinares* que se pueden seguir en la dinámica de trabajo colaborativo.

De esta manera, se está en concordancia con lo que afirma Bengt Hansson:

el reto no es tanto reflexionar sobre la naturaleza de trabajo disciplinario, sino sobre la naturaleza de los problemas que son abordados por aquél.

y lo que afirman R. Kötter y P. Balsiger:

es sólo el problema planteado el que define el tipo de práctica científica disciplinaria o supradisciplinaria que se requiere.

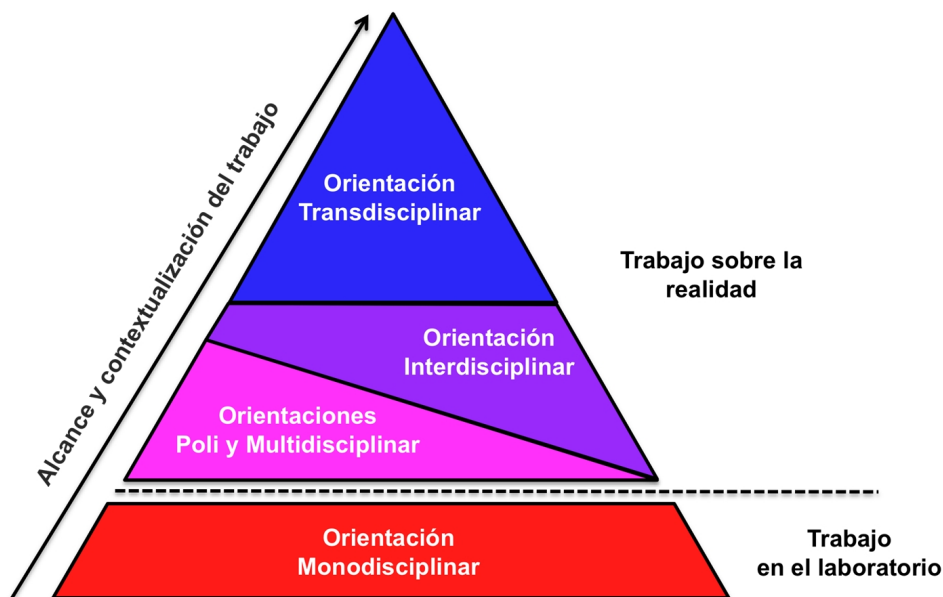


Figura 2: Pirámide de orientaciones disciplinares.

Si bien en la literatura se proponen diversos prefijos para tratar de distinguir la *orientación disciplinar* de la dinámica de trabajo colaborativo, en este documento se hará referencia a la *mono*, *poli*, *multi*, *inter* y *transdisciplinarietà*, mismas que se ubican en la figura 2 y se describen a continuación:

- Dinámica de trabajo monodisciplinar. El trabajo disciplinario hace uso del principio de reducción analítica para descomponer las situaciones de la realidad hasta aislar “experimentos”, en los que los fenómenos simples puedan ser abordados por especialistas dentro de un campo disciplinario.

Este enfoque ha sido muy exitoso y se le considera responsable de buena parte del progreso alcanzado en la ciencia y tecnología occidental en los últimos cuatro siglos. Sin embargo, esta especialización disciplinaria ha implicado también algunos costos; entre los más importantes, una fragmentación del conocimiento que difícilmente da cuenta de los problemas del mundo real.

Por ello, R. Ackoff comenta que la educación disciplinaria ha desarrollado nuestra habilidad para reconocer sólo algunas variables pertinentes, con el agravante de que también ha colocado *anteojeras* que impiden que veamos algunas otras que pudieran contribuir a la solución de los problemas.

- Dinámica de trabajo poli y multidisciplinar. Partiendo de la premisa de que los problemas de la realidad no se pueden confinar dentro de límites disciplinarios, las orientaciones poli y multidisciplinar representan un primer –y cauteloso– intento por integrar dos o más disciplinas dentro de un esfuerzo cooperativo. La estrategia consiste en reducir las situaciones complejas a un conjunto de situaciones más simples, susceptibles de ser abordadas por especialistas quienes, en opinión de Henyk Weitzenfeld, “trabajan juntos pero sin una relación específica”.

De esta manera, el trabajo multidisciplinario involucra la suma de conocimiento para alcanzar un objetivo común, sin tener que interferir o cambiar los paradigmas de las disciplinas involucradas.

Llevando este enfoque al ámbito del análisis y resolución de problemas, R. Ackoff sostiene que si se tiene éxito al descomponer el problema en problemas más simples e independientes entre sí, no será necesario realizar un esfuerzo adicional para integrar las soluciones puesto que la solución del todo será simplemente la suma de las soluciones de las partes independientes.

Así, en opinión de Köppen y coautores:

La multidisciplinaria crea una combinación aditiva de conocimiento, pero no da lugar a una integración en la cual dichos saberes se fusionen y enriquezcan mutuamente... cada especialidad se aboca a un aspecto distintivo del problema o asunto a investigar, y el producto resultante es la suma de todos estos esfuerzos.

Vale la pena recordar que en la polidisciplinaria participan al menos dos disciplinas diferentes, mientras que la multidisciplinaria se considera un caso particular en el que la polidisciplinaria se lleva al extremo de requerir la participación de muchas disciplinas.

- Dinámica de trabajo interdisciplinar. Enfrentado a situaciones complejas en las que el todo ya no es posible representarlo como la suma simple de par-

tes, la orientación disciplinar evoluciona hacia una estrategia en la que, bajo una perspectiva holista, opta por ya no dividir el sistema en componentes disciplinarios sino, por el contrario, analizarlo de manera integrada con la participación articulada de especialistas en diversas disciplinas.

El trabajo interdisciplinario, afirma Weitzenfeld, se caracteriza por “[...] las interrelaciones y la integración de los resultados del trabajo de diferentes especialistas”. En todo caso, el trabajo interdisciplinario requiere tanto un entendimiento de las disciplinas en sí mismas como un entendimiento sobre cómo conectar conocimientos disciplinarios.

De acuerdo con Köppen y coautores, los colaboradores en este tipo de empresa estudian lo necesario de ámbitos de saberes ajenos al de su competencia, con el fin de sentar las bases de un mutuo entendimiento. El reto más importante en este caso suele ser superar la barrera de comunicación que se establece entre especialistas que usualmente no comparten marcos conceptuales, ni lingüísticos.

- Dinámica de trabajo transdisciplinar. Ante la necesidad de valorar los impactos que el desempeño (de corto o mediano plazo) de un sistema complejo sobre el desempeño (de largo plazo) de un suprasistema, es que el trabajo disciplinario evoluciona nuevamente, ahora hacia una orientación en la que, bajo una dinámica de trabajo colaborativo entre diversos actores, se mantiene y perfecciona a través de ciclos continuos de aprendizaje. Se pretende extender el alcance del trabajo hasta construir marcos conceptuales y de lenguaje que, además de superar la barrera de comunicación entre los diferentes actores, permita reintegrar una visión de la naturaleza holista de la realidad.

En la literatura reciente se identifica a la transdisciplina no sólo por su naturaleza de trascender a las disciplinas, sino por su orientación hacia el análisis y resolución participativa de problemas sociales relevantes, para lo que se requiere, como refiere Olivé:

la concurrencia de especialistas de diversas disciplinas así como de... [actores]... que no provienen de ninguna disciplina pero que puede hacer aportes de conocimientos relacionados.

Kötter y Balsiger, llaman la atención sobre el origen extra-científico del problema, el foco está puesto en una forma totalmente diferente y en una calidad específica de este tipo de problema. No surge simplemente como resultado de un bien definido o interés particular, sino de la presencia de diversos intereses. En estos casos los intereses no son definidos de forma individual. La problemática involucrada concierne a toda la población de una región específica, a toda una sociedad, o incluso a toda la humanidad. En otras palabras, todos estos problemas conciernen a los bienes públicos y a la manera de lidiar con ellos.

De acuerdo con León Olivé, el trabajo transdisciplinario no parte de marcos conceptuales, ni de métodos probados previamente establecidos, como

serían los sistemas conceptuales y los paradigmas disciplinarios. Los grupos transdisciplinarios se constituyen frente a problemas específicos, para los que no hay métodos ni teorías establecidas. En parte, el desafío transdisciplinario es el de la construcción de los conceptos y de los métodos adecuados para entender los problemas y, desde luego, para resolverlos. El marco conceptual y los métodos adecuados se constituyen en el proceso mismo de la investigación y en su aplicación. La solución difícilmente surge de la aplicación de un conocimiento ya existente en una disciplina. Los resultados tampoco son asimilables a ninguna de las disciplinas, ni a las formas previas de generar conocimiento.

Rodolfo Suárez identifica los siguientes requerimientos como indispensables para el trabajo transdisciplinar:

1. Lenguaje genérico;
2. Actores con capacidad de modelación, mediación, asociación y transferencia;
3. Pluralidad epistémica;
4. Participación activa de los grupos de interés; y
5. Incorporación de las dimensiones ética y política, que lo mismo actúan al nivel de la construcción de conocimiento que en el aprovechamiento de sus resultados.

Además, como menciona Felipe Ochoa, en la transdisciplina se requiere del perfil de experiencia-conocimiento propio del generalista y de un enfoque de sistemas.

Mapa conceptual desde el enfoque de los sistemas

Utilizando los conceptos de *sistema*, *subsistema* y *suprasistema*, propuestos en el pensamiento de sistemas,² es posible aclarar el ámbito de pertinencia y utilidad de las orientaciones disciplinares que consideran a estas como una característica intrínseca a la dinámica del trabajo colaborativo.

De inicio, en la figura 3, se propone distinguir entre dos perspectivas para el trabajo disciplinar, el primero que, siguiendo una tradición reduccionista, aísla fenómenos de la realidad para estudiarlos en el laboratorio y el segundo que, siguiendo una tradición que llamaremos *expansionista*, decide estudiar la realidad *in situ*, con toda su complejidad.

² La perspectiva sistémica constituye una de las más poderosas herramientas del proceso gnoseológico, ya que permite conceptualizar y, en su caso, diseñar objetos como sistemas. Toma en cuenta las estructuras externas e internas del sistema en consideración. Las primeras se determinan mediante la identificación del papel que desempeñan en el suprasistema y sus relaciones con otros sistemas; las segundas presentan al sistema como un agregado hipotético de subsistemas funcionales, interconectados en forma tal que se asegure el cumplimiento del objetivo del sistema en el suprasistema.

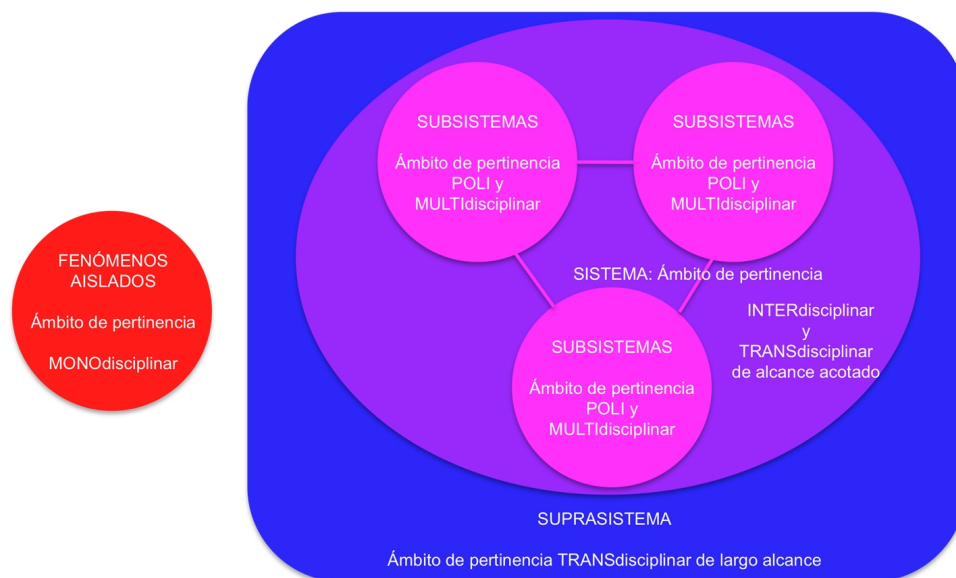


Figura 3: Ámbito de pertinencia para las distintas orientaciones disciplinares del trabajo colaborativo.

Es en la perspectiva reduccionista en la que una orientación disciplinar encuentra su ámbito de pertinencia. Por su parte, asociados a una perspectiva expansionista, se tienen tres casos diferentes: a) para el estudio independiente de los diferentes subsistemas que componen un sistema es el caso en el que una orientación multidisciplinar tiene su ámbito de pertinencia natural; b) para el estudio/intervención sobre el sistema en su conjunto, son las orientaciones interdisciplinar y transdisciplinar de alcance limitado (acotado a las relaciones intrasistémicas) las orientaciones más pertinentes y, finalmente, c) para estudiar e intervenir sobre los impactos acumulativos (de manera espacial y temporal) que tienen lugar en el entorno del sistema es la orientación transdisciplinar de largo alcance (incluye las relaciones entre el sistema y su suprasistema o entorno) la más adecuada. En la figura 4 se presenta en forma resumida la dinámica operativa que se seguiría en cada una de las orientaciones disciplinares descritas.



Figura 4: Dinámica operativa de las distintas orientaciones disciplinares para la dinámica de trabajo.

TENDENCIAS DISCIPLINARES FRENTE AL PARADIGMA DE LA SUSTENTABILIDAD

Si bien los enfoques hacia la sustentabilidad aún se encuentran en desarrollo, éstos ya han influido sobre los procesos cognoscitivos de la siguiente manera:

- Cuestionan una postura puramente reduccionista (identificada con la mono y la multidisciplina) a la vez que refuerza una tendencia expansionista (asociada con la inter y la transdisciplina).
- Amplían los ámbitos y dimensiones pertinentes, así como los horizontes espacial y temporal.
- Orientan hacia un trabajo inter y transdisciplinar.

Al respecto, Simon Bell y Stephen Morse anotan:

a pesar de que el reduccionismo ofrece una [perspectiva] útil y válida para un entendimiento parcial de muchas áreas de análisis, no proporciona bases válidas para nuestro entendimiento de la sustentabilidad... Si uno considera el mundo como hecho de partes desconectadas más que como un todo incluyente, la visión del mundo resultante puede ser restringida en términos del entendimiento de las relaciones y procesos que se combinan para el todo... Resulta valiosa [una perspectiva] más expansionista dentro del análisis y medición de la sustentabilidad.

Por su parte, Gladwin y coautores afirman que:

Las actividades económicas y humanas están vinculadas con los sistemas naturales. Debido al dinamismo y ciclicidad de este vínculo, se requiere un modo de entendimiento intuitivo sintético y no lineal... De frente a las amenazas de daños serios e irreversibles, las exigencias de una certeza científica no pueden ser usadas como una razón para posponer medidas que prevengan la degradación ambiental.

A su vez, Anthony Clayton y Nicholas Radcliffe comentan:

Los problemas del desarrollo son típicamente multidimensionales, multidisciplinares y multisectoriales... El entendimiento de las ramificaciones complejas de la sustentabilidad requiere la integración de información de un rango amplio de disciplinas... La tarea vital es encontrar la forma de integrar las dimensiones críticas del debate, para recoger o producir la información en lo científico, socio-económico y filosófico que orienten la generación de políticas prácticas y efectivas.

Con respecto a los procesos de intervención se identifican las siguientes influencias por parte del paradigma de la sustentabilidad:

1. Crítica a las posturas radicales tanto del conservacionismo como del transformismo, a la vez que se pugna por enfoques emergentes, hacia la sustentabilidad.
2. Amplía el alcance del concepto *grupo de interés* o *stakeholder*, así como los horizontes espacial y temporal.

3. Orienta hacia un diseño y ejecución más participativo y comprometido con una responsabilidad extendida.

En este contexto, Eva Kras apunta:

El deterioro del [entorno] no es una consecuencia ineludible del desarrollo humano, sino una característica de cierto tipo de crecimiento económico que prevalece en la actualidad, intrínsecamente insustentable en términos [ambientales], además de ser inequitativo e injusto desde el punto de vista social.

Por su parte, Manuel Ludevid señala:

Evitar el proceso de degradación ambiental significa dos cosas: cambiar el modelo dominante de producción y consumo de nuestro planeta y cambiar el orden económico y político internacional. . . Ambos se hallan impregnados de la civilización consumista de *usar y tirar* y de la creencia acrítica de que la tecnología resolverá todos nuestros problemas futuros del desarrollo.

Gladwin y coautores afirman:

El monismo moral, tanto del tecnocentrismo como del ecocentrismo, debe ser rechazado en aras de un sustentacentrismo [que considera que] las actividades humanas están vinculadas intrínsecamente con los sistemas naturales; que los sistemas económicos están soportados por los ecosistemas; que los cambios sucedidos a cualquiera de estos sistemas afectan inevitablemente al otro. . . Una economía prospera depende de una ecología saludable, y viceversa. . . Los partidarios del sustentacentrismo no tienen una actitud *antitecnológica*, sin embargo, siguen el desarrollo tecnológico con una actitud crítica; aceptan que la disponibilidad de la materia y la energía está vinculada a límites ambientales y entrópicos; consideran que el crecimiento de la población debe estabilizarse. . . [y] el consumo en el mundo desarrollado debe ser disminuido.

Al respecto, Bell y Morse opinan que:

múltiples perspectivas son necesarias para el entendimiento de la sustentabilidad. . . Los puntos de vista de todos los involucrados deben ser valorados e incluidos en el proceso de toma de decisiones. . . Es necesario cambiar la cultura vigente por otra más incluyente y tolerante de las creencias de los demás.

Siguiendo la lógica inicial propuesta para esta reflexión, cabría ahora preguntarnos: ¿cuál es la naturaleza de los problemas a que nos enfrenta el paradigma de la sustentabilidad del desarrollo? Con base en la respuesta dada a esta pregunta, se presentarán algunas recomendaciones tendientes a propiciar la sinergia entre las distintas orientaciones disciplinarias que resulten acordes con la naturaleza de los problemas identificados.

Integrando algunas propuestas

Se comenzará por reconocer que el paradigma de la sustentabilidad no parece ser superficial, más bien parece ser una transformación profunda que cuestiona la forma en cómo el ser humano, en la búsqueda de la satisfacción de sus necesidades, ha observado e intervenido el mundo; es una revolución cultural que invita a que

revisemos y modifiquemos nuestras creencias y conductas, tanto a nivel personal, comunitario y organizacional, como a nivel de la especie misma.

Así, lo que se enfrenta es un conjunto de problemas interrelacionados dentro de múltiples problemáticas cuyas manifestaciones alcanzan una escala regional, en el caso de los socioecosistemas, y global, en el de los sistemas antroambientales. Estas problemáticas presentan al menos tres complicaciones inherentes: a) son múltiples y muy diversos los sistemas involucrados, así como muy compleja su interacción, b) son múltiples los actores afectados y, c) son múltiples las instituciones involucradas. Estas tres complicaciones se verán reflejadas en la necesidad de que el proceso de análisis y resolución de problemas considere, respectivamente: una perspectiva sistémica del trabajo más allá de la disciplina, un esquema de participación de los diferentes actores involucrados y una corresponsabilidad transversal de las instituciones involucradas. Finalmente, todo ello nos ubica frente a la necesidad de redefinir el modelo de desarrollo vigente.

Reintegración de la visión del socio-ecosistema como un concepto transdisciplinar

La separación que hemos hecho entre el *mundo natural* y el *mundo humano* no es natural, es más bien una consecuencia artificial de nuestra cultura dominante. Nos recuerda Oliver Kozlarek que, hace dos siglos, el geógrafo, explorador y naturalista alemán Alexander von Humboldt concebía que:

en el Cosmos todo se relaciona con todo de manera analógico... para el científico prusiano *conciencia del mundo* significó una conciencia de la intrínseca asociación del mundo natural y del mundo humanos... Humboldt no vio en la complejidad una amenaza, sino un desafío sin igual para toda la humanidad, una oportunidad para enriquecer el conocimiento de todos acerca del mundo y de todos los demás seres humanos que lo habitan, sus culturas, sus particulares formas de vincularse con el mundo *natural* así como las relaciones interhumanas.

En este trabajo se propone estudiar los *socio-ecosistemas* y los *sistemas homo-ambientales* como sistemas pertinentes con un enfoque hacia la sustentabilidad.

Un socio-ecosistema se define como la conjunción indisoluble de un sistema social local y un ecosistema local. En dicha conjunción, ambos sistemas interactúan directa y estrechamente para lograr su coevolución, desarrollo y sobrevivencia conjunta. La noción de deterioro al interior del sistema no puede ser tolerada, ya que estaría atentando contra la estabilidad del mismo. Mantener la salud y resiliencia del conjunto sería una condición fundamental que debería ser garantizada por todo sistema productivo. Cuando esta condición de sustentabilidad local es extrapolada a los sistemas homo-ambientales, es decir, a la relación directa o indirecta que a un nivel regional o planetario se establece entre dos o más socio-ecosistemas, se estaría llegando a una condición de sustentabilidad global.

Es necesario insistir en que, para abordar el reto a que nos enfrenta el paradigma de la sustentabilidad del desarrollo, será necesario integrar diferentes miradas. En este sentido, Clayton y Radcliffe apuntan:

La investigación científica desarrolla nuestro entendimiento del comportamiento de los procesos naturales que dan forma al ambiente, para dar seguimiento al cambio, identificar tendencias y predecir resultados posibles. . . La investigación social y económica es esencial si es que vamos a determinar cuáles instrumentos económicos y políticos obtendrán los resultados deseados con el máximo de economía de medios y con el mínimo de efectos adversos en otros objetivos. . . también es necesaria para estimar la redistribución social probable y otras consecuencias de las decisiones políticas. . . El análisis filosófico y psicológico es esencial para elucidar la mezcla de supuestos racionales e irracionales que fundamentan el proceso de toma de decisiones éticas. . . Las perspectivas científicas, económicas y filosóficas. . . están cada una relacionada con un aspecto de la problemática. Si queremos entender ésta en sí misma, necesitamos contar con una forma para integrar [dichas perspectivas].

Los fenómenos implícitos en la sustentabilidad son demasiado complejos para el análisis deductivo y no son sujetos de un tratamiento estadístico. En estas condiciones, es la perspectiva de sistemas la que ofrece una aproximación metodológica más pertinente, así como una matriz multidimensional sobre la que una gran cantidad de información, proveniente de diferentes disciplinas y dominios, puede ser integrada.

Apertura intercultural

Bell y Morse afirman que el reconocimiento de que la sustentabilidad significa diferentes cosas para diferentes personas es un paso fundamental para entender la naturaleza de la problemática que enfrentamos.

Por su parte, R. Suárez urge sobre la “necesidad de configurar un *universalismo pluralista* que dé cuenta de la heterogeneidad del mundo”. Los enfoques transdisciplinarios podrían contribuir al logro de la sustentabilidad al consolidar redes (transversales y verticales) de actores capaces de establecer diálogos fructíferos tendientes al análisis, diseño, implantación y evaluación de políticas que permitan avanzar hacia lo sustentable, tanto a nivel local, como regional y global.

En esa misma dirección, L. Olivé propone desarrollar la noción de *redes sociales de innovación* que, bajo una orientación transdisciplinaria, integren conocimientos tradicionales y científicos para afrontar los problemas sociales y ambientales contemporáneos.

Ampliación de la participación hacia todos los actores involucrados

El paradigma de la sustentabilidad asume la necesidad de lograr, en condiciones de justicia y equidad, la satisfacción de las necesidades legítimas del grupo promotor de la intervención, de los grupos de interés internos al sistema de intervención en sí, y de los grupos de interés externos (incluyendo a representantes de los sistemas naturales y de las generaciones futuras) que permanecen en el entorno de la intervención.

Desde luego, la participación de todos los actores afectados multiplica los puntos de vista en el debate y, por lo tanto, los posibles conflictos de interés. Si bien esto

aparentemente complica el ya de por sí complejo proceso de análisis y el establecimiento de acuerdos y consensos, no cabe duda que esta incorporación también trae el beneficio de enriquecer el análisis, al incorporar puntos de vista legítimos que, de no ser tomados en cuenta, podrían disminuir la sustentabilidad de la intervención.

Por otro lado, el hecho de que sean tomados en cuenta los *intereses del entorno natural* y los *intereses de las generaciones futuras*, convierte a los representantes de estos grupos de interés (que de otra manera mantendrían una postura crítica y opositora) en corresponsables de la intervención, aumentando así el sustento que esta última pudiera recibir.

Bajo un enfoque dirigido *hacia la sustentabilidad* la motivación se tornaría hacia atender, de manera satisfactoria y simultánea, los intereses de todos los agentes, personas o elementos que forman parte e interaccionan dentro de los socio-ecosistemas y los sistemas homo-ambientales involucrados.

Como una consecuencia de lo anterior, también sería necesario redefinir los derechos y responsabilidades que asumen los inversionistas directos e indirectos de la intervención, los grupos de interés humanos internos y externos de aquél (incluyendo a las generaciones futuras), así como los grupos de interés que representen a los sistemas naturales.

Así, bajo este enfoque, un promotor estaría comprometido con llevar al máximo los beneficios del socio-ecosistema y del sistema homo-ambiental, así como con promover su distribución aceptable, justa y equitativa, entre todos los grupos de interés y sistemas involucrados en la intervención a cualquier escala.

Corresponsabilidad transversal de las instituciones involucradas

En la descripción que, en el 2005, se hizo del tema central para el I Congreso Nacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo se lee:

La transversalidad de las políticas públicas para el desarrollo sustentable representa una estrategia para revertir la contaminación ambiental y la degradación ecológica en México mediante la construcción de acuerdos básicos y compromisos explícitos entre instituciones del gobierno federal con los tres órdenes de gobierno. De esta manera se persigue que las decisiones y acciones públicas no rivalicen entre sí y colaboren con la obtención del desarrollo sustentable.

Al respecto, Clayton y Radcliffe advierten:

el número, la complejidad y las interrelaciones entre las instituciones involucradas nos indican que una estrategia que consista de ajustes relativamente desconectados entre sí y de las políticas y los medios económicos y sociales... es menos probable que sea exitosa que un intento sistemático de construir un sistema socio-económico que embone e interactúe apropiadamente con los sistemas ambientales del planeta... Una aproximación tal debería incluir la evaluación y re-valoración de la mayoría de los objetivos sociales y económicos. De hecho, muchas de las organizaciones existentes así como los conceptos y estructuras políticas y económicas, en la actualidad, son probablemente inapropiadas... y será necesaria cierta transformación organizacional y política. Esto

a su vez no es probable que suceda si no se acompaña de una evolución paralela de los conceptos culturales y psicológicos sobre los cuales se basan en último término las estructuras políticas y sociales. . .

RETOS Y OPORTUNIDADES PARA LAS UNIVERSIDADES

La institución universitaria es causa y efecto del auge que ha tenido el modelo disciplinar como pauta para realizar investigación y desarrollo. A su vez, la ciencia y la tecnología se constituyen como piedras angulares para explicar el modelo de desarrollo/deterioro seguido en el mundo moderno.

Ya sea por razones de sobrevivencia o de competencia, desde hace varios años están emergiendo, en el seno de la sociedad postmoderna, nuevas arenas y modelos para llevar a cabo los procesos de investigación, desarrollo e innovación. En el centro de este movimiento se encuentra un reconocimiento de la *complejidad* y una orientación hacia el *análisis y resolución de problemas*. El papel que las universidades van a desempeñar en la sociedad del futuro dependerá de cómo se posicione frente a este escenario de cambio.

Parece prudente explorar la posibilidad de realizar un esfuerzo consciente por desparcellar (no de manera general, sino selectiva) algunos aspectos de su quehacer institucional, para dar paso a nuevas estructuras y procesos *más allá de las disciplinas*, que orientadas hacia el análisis y resolución de problemas se complementen con aquellas estructuras y procesos disciplinarios que no sólo representan el fruto del trabajo universitario –por ya casi cuatro siglos–, sino que a la vez conforman el fundamento disciplinario sin el cual no sería posible iniciar la aventura *más allá de la disciplina*.

Ante las nuevas tendencias, las instituciones de investigación y educación superior enfrentan varios retos, entre éstos, L. Olivé sugiere:

- Formar especialistas con la actitud y las capacidades para formar parte de equipos transdisciplinarios.
- Abrirse para abordar problemas que pueden requerir de la convergencia de disciplinas.
- Fomentar el trabajo interdisciplinario.
- Fomentar la colaboración con grupos y sectores sociales cuyo conocimiento y trabajo no es disciplinar.

Sin embargo, el mismo autor afirma que son varias las inercias que los investigadores deberán remontar para avanzar en la dirección propuesta, entre otras destaca:

- Rigidez en las estructuras y modos de organización disciplinarios.
- Rigidez en la orientación disciplinaria de los procesos de evaluación académica.

- Excesiva confianza (en ocasiones dogmática) en torno a la investigación disciplinaria.

Propuestas para el desarrollo futuro de la Universidad

Todos los elementos analizados hasta aquí permiten comprender por qué actualmente se observa una tendencia clara hacia la consideración de que los problemas relacionados con la sustentabilidad del desarrollo son problemas muy complejos que requieren ser abordados en un esfuerzo transversal, entre las distintas instituciones involucradas, a través de una orientación del trabajo de tipo transdisciplinario y una perspectiva sistémica.

Si bien la postura anterior parece razonable no hay que olvidar que nuestra habilidad para el trabajo transdisciplinario, interdisciplinario, e incluso poli y multidisciplinario tiene como plataforma a la disciplina(riedad) y que no resultaría prudente una estrategia en la que se pretenda saltar a un nivel superior de la pirámide disciplinaria (ver figura 5) sin previamente haber cimentado, anclado y dominado los niveles que le preceden.

Para contribuir al logro de una sociedad más sustentable, en este trabajo se propone, a manera de síntesis, que la Universidad deberá reorientar su pensamiento y práctica para considerar entre otros, las siguientes políticas:

1. Reintegrar una visión del socio-ecosistema como la unidad pertinente para los estudios de la sustentabilidad.
2. Llevar a cabo investigaciones que contribuyan a integrar un enfoque y un paradigma socioecocéntrico para el desarrollo.
3. Abrazar el principio de apertura intercultural.
4. Asumir un principio participativo que involucre en sus investigaciones al mayor número posible de actores y agentes involucrados.
5. Suscribir y promover el principio de corresponsabilidad ampliada y transversal de las instituciones.
6. Establecer una dinámica sinérgica que vincule los quehaceres de investigación básica y aplicada (de objetivo básico, de evaluación, aplicada y de acción de investigación).

Para este último punto, será necesario complementar de manera paulatina los grupos y habilidades para el trabajo disciplinar con aquellos otros requeridos para el trabajo colaborativo (poli, multi, inter y transdisciplinario). La estrategia seguida puede ser ilustrada a través de la pirámide de la figura 5, cuya estructura es análoga a aquella utilizada para ilustrar y relacionar tanto los diferentes tipos de situación/problema existentes (ver figura 1) como los diferentes tipos de dinámica disciplinaria (ver figura 2).



Figura 5: Estructura disciplinaria propuesta para la Universidad.

Para avanzar en esta pirámide, se tendrán que resolver los diferentes problemas que se presentan en el camino utilizando, para ello, una orientación diferenciada –por niveles– para el trabajo disciplinario: en la cúspide de la pirámide lo que se requiere es una orientación transdisciplinar, que permita abordar situaciones/problema relacionadas con el impacto integral de diferentes sistemas sobre el entorno. En el nivel intermedio lo que se requiere es una orientación poli, multi e interdisciplinar, para abordar las situaciones/problema relacionados, respectivamente, con el desempeño de sistemas tanto sencillos como complejos. Finalmente, en la base de la pirámide será necesaria una orientación disciplinar que continúe enriqueciendo, a través de experimentos, el conocimiento básico sobre los fenómenos aislados relacionados con la sustentabilidad.³

Si bien es cierto que la solidez de los niveles superiores se verá favorecida por la solidez de los niveles precedentes, también es cierto que la construcción de cada nivel requiere habilidades emergentes que no parecían necesarias en los niveles previos. Esto es equivalente a afirmar que más y mejor trabajo disciplinario podría favorecer –aunque no necesariamente evolucionar en sí mismo hacia– un trabajo multidisciplinario o interdisciplinario, y que más o mejor trabajo multidisciplinario o interdisciplinario podría favorecer –aunque no necesariamente evolucionar en sí mismo hacia– un trabajo transdisciplinario. Así, el desarrollo de cada nivel

³ Aunque, cabe aclarar, que estos conceptos pueden aplicar para cualquier otra problemática compleja.

depende de los fundamentos que lo preceden, pero además exige elementos emergentes novedosos.

Es esta necesidad de operar “a todos los niveles” lo que hace suponer que, para enfrentar con éxito los retos que nos impone el aspirar a lograr un estilo de vida y desarrollo más sustentable, será necesaria una estrategia que no sólo perfeccione nuestra destreza para trabajar de manera independiente –bajo los diferentes tipos de orientaciones disciplinarias descritas– sino, sobre todo, para establecer una dinámica sinérgica entre los productos derivados de cada una de ellas.

Hoy en día, parece que la situación prevaleciente es aquella en la que, guiados por la curiosidad científica, hemos concentrado casi exclusivamente el esfuerzo en los ámbitos de trabajo disciplinario y multidisciplinario. Si bien es necesario ampliar la base de la pirámide del conocimiento básico, el siguiente listado de acciones sería también conveniente.

En el nivel cúspide (nivel considerado como estratégico):

- Identificar socioecosistemas y sistemas antropambientales relevantes, sobre los que se juzga pertinente llevar a cabo investigación transdisciplinaria para estudiar y controlar su perfil de sustentabilidad.
- Integrar equipos y generar las condiciones adecuadas para el trabajo transdisciplinario.
- Integrar los conocimientos pertinentes al caso, generados en los niveles basal y medio de la pirámide.
- Integrar los marcos filosóficos, teóricos y metodológicos asociados a la sustentabilidad de los socioecosistemas y los sistemas antropambientales.

En el nivel medio de la pirámide (nivel que eventualmente puede ser considerado como contingente):

- Identificar sistemas (sencillos o complejos) relevantes, sobre los que se juzga pertinente llevar a cabo investigación multi o interdisciplinaria, para estudiar y controlar su desempeño.
- Integrar equipos y generar las condiciones adecuadas para el trabajo multi e interdisciplinario.
- Incluir dentro de las prioridades atender los requerimientos y necesidades que enriquezcan el trabajo de los grupos transdisciplinarios.
- Integrar los conocimientos disciplinarios pertinentes del caso, generados en el nivel basal.
- Integrar los marcos filosóficos, teóricos y metodológicos asociados al desempeño de diferentes sistemas sencillos y complejos.

En el nivel basal de la pirámide (nivel considerado como estratégico):

- Incluir dentro de las prioridades atender los requerimientos y necesidades que enriquezcan el trabajo de los grupos multi, inter y transdisciplinarios.

Así, el verdadero reto no es dar mayor prioridad a una orientación del trabajo disciplinario sobre las otras sino propiciar, de manera sinérgica y partiendo de los logros ya alcanzados por la disciplina y la multidisciplina, que el trabajo futuro continúe ensanchando el nivel basal (disciplinario) de la pirámide, al mismo tiempo que proyecte el crecimiento de ésta hacia los niveles emergentes de la inter y la transdisciplina.

A MANERA DE CONCLUSIÓN

La Universidad se encuentra ante la posibilidad de aprovechar fructíferamente una oportunidad estratégica. Un colega, el biólogo Anselmo Galindo Molina, ha apuntado que la Universidad puede y debe:

abordar y retener un nicho de estudio transdisciplinario recientemente abierto al ejercicio académico –el de la sustentabilidad del desarrollo productivo en las sociedades contemporáneas–.

Para la universidad mexicana esto ocurre en un momento en el que se avanza hacia la tecnologización de las sociedades y la sustancia misma de esta área de estudios apenas está formándose, por ello, es todavía un terreno abierto al potencial de creatividad que los grupos académicos puedan generar.

En opinión de Anders Wijkman, para alcanzar un enfoque de desarrollo más integrado y una sustentabilidad a nivel planetario, será necesario que la comunidad científica asuma un liderazgo firme en la resolución de muchos problemas que actualmente limitan dicha posibilidad. Por su parte, Garry Brewer afirma que las universidades deberían también proveer a las nuevas generaciones de estudiantes con las habilidades, perspectivas y conocimientos necesarios para actuar con responsabilidad frente a los problemas del deterioro ambiental:

Debemos formar a los profesionales del futuro para que sean capaces de trazar caminos más allá de sus propias disciplinas, hasta lograr ensanchar la propia perspectiva a los niveles que con urgencia requiere la protección ambiental.

El reto para las universidades, ante el paradigma de la sustentabilidad del desarrollo, podría ser formulado de la siguiente manera: la Universidad, institución cuyo origen y éxito ha dependido esencialmente de la especialización del conocimiento, la organización departamental y el trabajo disciplinario y multidisciplinario, deberá evolucionar para fomentar decididamente el trabajo en ámbitos inter y transdisciplinarios, así como para ampliar su mirada (e influir en que la sociedad, en su conjunto, haga lo propio) para reconocer a los sociosistemas como los sistemas epistémicos y de intervención pertinentes a ser integrados, valorados, atendidos en su problemática, es decir, reconocidos como las unidades sujetas de desarrollo y orientadas hacia la sustentabilidad.

En opinión de G. Brewer, pensar en cómo se puede ser diferente, a la vez que se logra una coexistencia con los paradigmas disciplinario y departamental dominantes, representa todo un reto para la comunidad universitaria:

una estrategia que ataque frontalmente al modelo disciplinario consistentemente nos llevaría al fracaso. El mismo destino tendría intentar aumentar el número y tamaño de programas interdisciplinarios especializados hasta un punto en que se conviertan en motivo de celos y rivalidad para las disciplinas y departamentos convencionales... debemos alejarnos del intento por tratar de transformar a toda la institución; más bien debemos crear un mayor espacio y margen para iniciativas innovadoras. Desde luego que deberemos ser igualmente creativos para encontrar los medios a través de los cuales dichos individuos puedan ser reconocidos y recompensados.

De esta manera, promover una coexistencia sinérgica entre las diferentes orientaciones disciplinarias es el gran reto de las universidades. Las universidades son instituciones que han desarrollado una cultura organizacional sólida. Para hacer frente al reto de contribuir a construir una sociedad cada vez más sustentable, deberán ampliar su quehacer en ámbitos de la docencia, la investigación, la extensión y la gestión universitarias, para dar cabida a la coexistencia sinérgica de orientaciones inter y transdisciplinarias con las más tradicionales. Así, las universidades se encontrarán en mejor situación para vincularse decididamente con la sociedad del siglo XXI, competitiva y problematizada, en cuyo seno funcionan y a cuyo bienestar deben quedar éticamente abocadas.

BIBLIOGRAFÍA

- Ackoff, R. 1973. "Science in the systems age: Beyond industrial engineer, operations research and management sciences". *Operations Research*, 21(3), May-June.
- Ackoff, R. 1997. *El arte de resolver problemas*. Limusa-Noriega Editores.
- Bell, S. and S. Morse. 1999. *Sustainability Indicators: Measuring the immeasurable?* EarthScan Publications Ltd.
- Bolaños, B. 2010. "Más acá y más allá de las disciplinas. De las capacidades cognitivas a los estilos de razonamiento científico". En Peláez, A. y R. Suárez (coords.), *Observaciones filosóficas en torno a la transdisciplinariedad*. Anthropos y Universidad Autónoma Metropolitana.
- Brewer, G. D. 1999. "The challenges of interdisciplinarity". *Policy Sciences*, 32(4):327-337.
- Casanueva, M. y D. Méndez. 2010. "Notas a favor de la transdisciplina o hacia una epistemología de las relaciones mereológicas entre modelos teóricos y sistemas empíricos". En Peláez, A. y R. Suárez (coords.), *Observaciones filosóficas en torno a la transdisciplinariedad*. Anthropos y Universidad Autónoma Metropolitana.
- Checkland, P. 1997. *Pensamiento de Sistemas, Práctica de Sistemas*. Noriega Editores.
- Clayton, A. and N. Radcliffe. 1996. *Sustainability: a systems approach*. Earthscan.
- Galison, P. 1997. *Image and Logic. A Material Culture of Micropysics*. The University of Chicago Press.
- Gibbons, M., C. Limoges, H. Nowotny, S. Schwartzman, P. Scott and M. Trow. 1994. *The New Production of Knowledge: The Dynamics of Science and Research in Contemporary Societies*. Sage.
- Gladwin, T., J. Kennelly and T. Krause. 1995. "Shifting paradigms for sustainable development: Implications for management theory and research". *Academy of Management Review*, 20(4):874-907.
- González-Castillo, O. 2008. *Diseño de un instrumento de planeación para incorporar, en la evaluación de sistemas, enfoques hacia la sustentabilidad*. Tesis de doctorado, Facultad de Ingeniería, UNAM. México.
- Hacking, I. 1999. *The Social Construction of What?* Harvard University Press.
- Hansson, B. 1999. "Interdisciplinarity: For what purpose?" *Policy Sciences*, 32(4):339-343.
- Karlqvist, A. 1999. "Going beyond disciplines: The meanings of interdisciplinarity". *Policy Sciences*, 32(4):379-383.
- Köppen, E., R. Mansilla y P. Miramontes. 2005. "La interdisciplina desde la teoría de los sistemas complejos". *Ciencias*, (79):4-12, julio-septiembre.
- Kötter, R. and P. Balsiger. 1999. "Interdisciplinarity and transdisciplinarity: A constant challenger to the sciences". *Issues in Integrative Studies*, (17):87-120.
- Kozlarek, O. 2010. "Humanismo y «conciencia del mundo» como orientaciones para una ciencia transdisciplinaria e intercultural". En Peláez, A. y R. Suárez (coords.), *Observaciones filosóficas en torno a la transdisciplinariedad*. Anthropos y Universidad Autónoma Metropolitana.
- Kras, E. 1994. *El desarrollo sustentable y las empresas*. Grupo Editorial Iberoamérica.
- Ludevid-Anglada, M. 1998. *El cambio global en el medio ambiente: Introducción a sus causas humanas*. Alfaomega-Marcombo.
- Masera, O., M. Astier y S. López. 1999. *Sustentabilidad y manejo de recursos naturales (El marco de evaluación MESMIS)*. Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropia

- (GIRA) y Mundi-Prensa México S.A. de C.V.
- Moss-Simõe-dos Reis, V. y A. Passos-Videira. 2010. "Transdisciplinariedad y filosofía de la ciencia. ¿Una solución posible al problema de la privatización del conocimiento?". En Peláez, A. y R. Suárez (coords.), *Observaciones filosóficas en torno a la transdisciplinariedad*. Anthropos y Universidad Autónoma Metropolitana.
- Ochoa, F. 1997. *Método de los sistemas*. División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM. Colección: Cuadernos de Planeación y Sistemas.
- Olivé-Morett, L. 2010. "Conocimientos tradicionales e innovación: desafíos transdisciplinarios". En Peláez, A. y R. Suárez (coords.), *Observaciones filosóficas en torno a la transdisciplinariedad*. Anthropos y Universidad Autónoma Metropolitana.
- Peñuela Velázquez, A. 2005. "La transdisciplinariedad. más allá de los conceptos, la dialéctica". *Andamios. Revista de Investigación Social* [en línea], 1(2):43-77, junio. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62810203> (consultado el 05/03/2015).
- Peláez, A. 2010. "La enciclopedia de la ciencia unificada y la cuestión de la transdisciplina". En Peláez, A. y R. Suárez (coords.), *Observaciones filosóficas en torno a la transdisciplinariedad*. Anthropos y Universidad Autónoma Metropolitana.
- Ramírez, S. 2010. "El mito de las culturas: reflexiones en torno a las investigaciones humanísticas en la interdisciplina". En Peláez, A. y R. Suárez (coords.), *Observaciones filosóficas en torno a la transdisciplinariedad*. Anthropos y Universidad Autónoma Metropolitana.
- Suárez-Molinar, R. 2010. "Sobre los usos sociales del concepto transdisciplina". En Peláez, A. y R. Suárez (coords.), *Observaciones filosóficas en torno a la transdisciplinariedad*. Anthropos y Universidad Autónoma Metropolitana.
- Weitzenfeld, H. 1996. *Manual básico sobre evaluación del impacto en el ambiente y la salud*. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud.
- Wijkman, A. 1999. "Sustainable development requires integrated approaches: A world in transition". *Policy Sciences*, 32(4):345-350.
- Wilbert, K. 1995. *Sex, ecology, spirituality: The spirit of evolution*. Shambhala.

⊙ *Esta es una página en blanco.* ⊙

SISTEMAS DINÁMICOS Y CAOS: LOS LÍMITES DE LA PREDICCIÓN

Lidia Jiménez-Lara*

No existe en el mundo nada más poderoso que una idea a la que ha llegado su tiempo.

Victor Hugo

* * *

La palabra *dinámica* significa cambio o movimiento; en griego, *dýnamis* significa fuerza que produce un cambio. El interés por la dinámica es tan antiguo como el hombre; los seres humanos siempre nos hemos maravillado de las cosas que ocurren en el universo, y nos hemos hecho la pregunta obligada: ¿por qué es así?

A lo largo de la historia hemos dado muy diversas respuestas al por qué ocurren las cosas, cómo funcionan, cómo ocurren los cambios en la naturaleza, en los seres vivos y en las sociedades. Una de las formas en que nos hemos respondido estas preguntas ha sido a través de la ciencia y el lenguaje que esta usa, que es el de las matemáticas. En el intento por explicar los fenómenos, hemos tenido que hacer muchas simplificaciones, como aislar algunos elementos que nos interesa comprender y que interactúan entre sí (y posiblemente con lo que los rodea); al conjunto de elementos que aislamos le llamamos sistema.

En particular, el estudio de los *sistemas dinámicos* propone teorías y modelos que tratan de captar, en forma matemática, las características más importantes de un sistema, buscando explicar y predecir cambios a escala macroscópica, así como el comportamiento que emerge debido a las interacciones de sus partes. Ejemplos de sistemas dinámicos pueden ser el movimiento de los astros (sol, planetas, lunas, asteroides, cometas, etc.); el funcionamiento de las células, tejidos, órganos, seres vivos; el comportamiento de colonias de hormigas, cardúmenes, parvadas, el mercado de valores, etc.

La visión analítica de la ciencia considera que un sistema dinámico puede comprenderse estudiando los elementos que lo conforman y sumando sus efectos. Pero muy frecuentemente es más que eso, o a veces menos, pues emergen propiedades que no se deben a ninguno de sus elementos constitutivos, sino a la forma en que interactúan en su conjunto.

* Departamento de Física, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. / lidia@xanum.uam.mx

La regularidad del movimiento de los astros en el firmamento ha asombrado y generado curiosidad en todas las culturas. Los movimientos de la bóveda celeste eran demasiado regulares como para ser coincidencia, lo que dio lugar a la creencia de que debía haber ciertas leyes invariables que explicaran cómo y por qué se mueven los astros. De hecho, la ciencia está fundamentada en la creencia de que deben haber ciertas leyes subyacentes que explican el comportamiento de la naturaleza y que nos permiten hacer predicciones sobre ella.

Si bien los orígenes de los sistemas dinámicos los encontramos en la mecánica celeste, es en esta disciplina donde surgió por primera vez la idea del caos, que parecía ir en contra del objetivo buscado por la ciencia a finales del siglo XIX. Este será el tema de estudio de este capítulo. Veremos la diferencia entre los llamados sistemas lineales y no lineales, siendo estos últimos donde aparece el sorprendente fenómeno del caos y la complejidad, que ha tenido gran impacto en la ciencia y un cambio profundo de los paradigmas. Seguiremos su desarrollo hasta su concepción actual, destacando las diferencias fundamentales que hay entre el caos y el desorden o el azar. Comencemos con una breve revisión histórica de los sistemas dinámicos.

BUSCANDO EL ORDEN, TERMINAMOS EN EL CAOS

Las más antiguas creencias sobre el origen del universo hacen referencia a un estado primigenio de confusión y caos antes de la creación del cosmos; una vez introducido el orden en el cosmos, por dioses o un ser supremo, se pensaba que lo que ocurría en la naturaleza se debía al capricho de éstos. Una de las más importantes aportaciones de la antigua cultura griega es que comenzó a buscar explicaciones sobre la naturaleza que no dependieran de aspectos míticos y religiosos, probablemente debido a que los dioses griegos tenían características humanas.

Los primeros filósofos griegos buscaron la esencia del cosmos y de la realidad con base en el pensamiento racional. Heráclito, en el siglo VI a.C. pensaba que el universo se encontraba en un continuo devenir o cambio, en contraste con Parménides que afirmaba que todo cambio era ilusorio. La influencia de Parménides fue muy importante en muchos filósofos griegos, como Pitágoras y Platón, quienes valoraban la *idea* y la abstracción muy por encima de la realidad observada y la aplicación práctica. Pensaban que el trabajo manual y la curiosidad técnica no eran dignos del *hombre libre*, apreciando mucho más la especulación desinteresada. Esta influencia subsistió en la cultura occidental por casi 2 mil años.

En el siglo III a.C. Euclides sintetizó el conocimiento sobre matemáticas y geometría de su época en sus *Elementos*, obra en trece libros. Las raíces de la geometría vienen de culturas más antiguas y, en última instancia, surgen como una respuesta a necesidades prácticas de las sociedades civilizadas para la medición de parcelas, trazo de avenidas y ciudades, etc., todos estos aspectos estáticos que no involucran al movimiento. Los *Elementos* de Euclides marcan un momento determinante en la historia de la ciencia, pues en ellos Euclides establece, por primera vez, un método sistemático de demostración que, siglos después, vendría a regir la manera en la

que se hacen las matemáticas. La geometría euclidiana es la primera teoría consistente que tuvo la humanidad, partiendo de axiomas y con reglas para hacer nuevas inferencias.

En cuanto a la dinámica, los griegos tuvieron muchos problemas para comprender el movimiento. Recordemos, por ejemplo, una de las 40 paradojas de Zenón, alumno de Parménides: una persona nunca podrá cruzar un estadio pues antes tiene que cruzar la mitad, y antes de cruzar esa mitad tendrá que cruzar la mitad de esa mitad, y así sucesivamente, hasta el infinito. Entonces tendría que cruzar infinitas distancias, ciertamente más pequeñas cada vez, pero infinitas al fin, y eso es infinito, por tanto es imposible, aunque esto vaya en contra de la experiencia.¹ De ello, concluían que el movimiento es imposible.

Por otra parte, Aristóteles, en el siglo IV a.C., afirmaba que para que los objetos de la Tierra se movieran, era necesario que hubiera una fuerza impulsora, pues su estado natural era el reposo. Únicamente los cuerpos celestes se movían eternamente en círculos sobre esferas centradas en la Tierra, separando claramente el movimiento perfecto de los cielos incorruptibles del movimiento de los objetos terrestres.

Estos últimos estaban constituidos por cuatro elementos en distintas proporciones: agua, aire, fuego y tierra, que determinan sus propiedades. El movimiento natural del agua y la tierra era hacia abajo, y del aire y fuego hacia arriba. Cuanto más pesado fuera un objeto, más grande sería su velocidad de caída. Un objeto podía tener movimiento violento al lanzarlo, siendo el aire el que lo mantendría en movimiento mediante un impulso que provendría de llenar el vacío que va dejando tras de sí el objeto. Estas ideas servían para describir cualitativamente algunos movimientos, pero dejaban fuera muchas “excepciones” y carecían de una base matemática equivalente al trabajo de Euclides y su geometría.

Es notable que en el siglo II a.C. Aristarco propusiera el modelo heliocéntrico, con la tierra girando en círculos alrededor del sol, porque los círculos “son perfectos”, e Hiparco hiciera mediciones astronómicas muy precisas: calculó con buena aproximación la distancia entre la tierra y la luna aprovechando un eclipse lunar.

Hay un largo periodo, en la Edad Media, que muchos consideran una época de muy pobre avance científico. En realidad esto sólo es cierto en Europa, pues en esa época se desarrollaron las matemáticas que servirán como base para la construc-



Figura 1: Hiparco, siglo II a.C.

¹ En realidad el manejo de los infinitesimales es sumamente delicado y no será resuelto sino hasta el siglo XVII. Sin embargo, el infinito sigue dejando abiertas muchas preguntas en las matemáticas hasta la fecha.



Figura 2: Escuela de Atenas, fresco de Rafael Sanzio, 1511 d.C., Museo Vaticano.

ción de la ciencia moderna. Este extraordinario trabajo correspondió a los hindúes y árabes que aportaron a Occidente la invención del cero, la notación posicional de los números, la aritmética, el álgebra y la trigonometría.



Figura 3: Galileo Galilei (1564-1642).

La ciencia moderna inicia con Galileo, quien introduce el método experimental como parte fundamental del método científico. Es bien sabida la lucha que tuvo que enfrentar Galileo con la iglesia católica, que tenía como base “científica” la filosofía aristotélica adaptada por Tomás de Aquino. No había cabida para cuestionar la gran autoridad que representaban Aristóteles y la Biblia. Galileo se interesó por el movimiento cuando, probablemente aburrido durante los sermones en la catedral de Pisa, observó que el candil tardaba siempre el mismo tiempo en dar una oscilación completa. Esto significa que su *periodo* es independiente de la amplitud de oscilación (isócrono), sólo depende de la longitud del candil. Al modelo que describe las pequeñas oscilaciones de un candil, como el de la catedral de Pisa, y de cualquier otro objeto que cuelga y oscila libremente, se le conoce como *oscilador armónico*, un modelo fundamental de la física.

Galileo observó que los objetos no tienden al reposo, como afirmaba Aristóteles,

sino a continuar su movimiento con velocidad constante. Además, realizó mediciones sobre la caída de los cuerpos y descubrió las leyes empíricas de la cinemática, que describen *cómo* se mueven los cuerpos en el campo gravitacional de la Tierra: con qué velocidad caen, cuál es su aceleración, cuánta distancia recorren conforme transcurre el tiempo. Para este estudio, ideó utilizar planos inclinados que retardan la caída de los objetos. También estudió el movimiento de los planetas, apoyando abiertamente las ideas heliocéntricas de Copérnico. Descubrió lunas en Júpiter y los anillos de Saturno.

En el siglo XVII, Johannes Kepler, contemporáneo de Galileo, estudió la gran cantidad de datos recopilados por Tycho Brahe sobre el movimiento planetario y descubrió que no eran círculos, como habían supuesto Platón, Ptolomeo y Copérnico, sino elipses con el Sol en uno de sus focos. Kepler logró sintetizar todas las observaciones de su época en sus tres leyes cinemáticas del movimiento planetario. Las vidas de Kepler, Galileo y Tycho son igualmente fascinantes, pues incluyen desde una nariz de oro hasta un cuento que motivó una acusación de brujería. Vale la pena conocerlas, aunque en este texto no tomaremos ese camino.

Aún con los grandes avances de Kepler, faltaba dar el siguiente y más importante paso: comprender las causas, el *porqué* se mueven los planetas y, en general, cómo lo hacen los objetos, es decir, inventar la dinámica. Fue Isaac Newton quien, impulsado por el astrónomo Edmond Halley, logró la gran síntesis que relacionaba las causas (el porqué), con los efectos (el cómo) en una sola teoría publicada en los *Principia Mathematica*, en 1687. Su trabajo fue monumental. Construyó las matemáticas necesarias para estudiar el movimiento y sus cambios: el cálculo infinitesimal,² descubierto de forma independiente por Gottfried Leibniz. Además, propuso tres leyes fundamentales para estudiar la dinámica de los cuerpos, y encontró una expresión matemática para la ley de atracción gravitacional universal entre todos los objetos, celestes y terrenales.

Las tres leyes de Newton de la mecánica, llamada desde entonces newtoniana, afirman que:

1. Todos los objetos se mueven con velocidad constante en ausencia de fuerzas.
2. El cambio del estado de movimiento (del *momentum*, \vec{p} , que es el producto masa por velocidad) en el tiempo es la fuerza.
3. Las interacciones siempre vienen en pares *acción-reacción* de magnitudes iguales y direcciones opuestas.

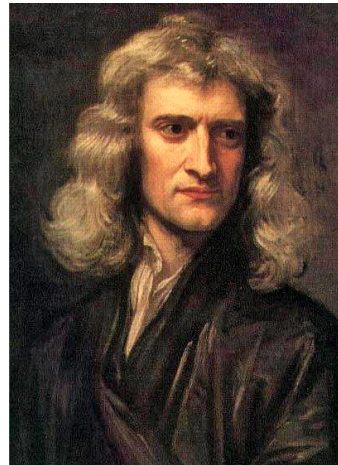


Figura 4: Isaac Newton (1642-1727).

² Newton lo llamaba cálculo de *fluxiones*, porque decía que una cantidad fluye al cambiar.

La primera es la ley de inercia de Galileo, aunque él se refería a los cuerpos terrestres, mientras que Newton se dio cuenta que también aplicaba a los cuerpos celestes. Newton comprendió que debía haber una fuerza que los desviaba, pasando del movimiento recto *galileano* a un movimiento elíptico, y la nombró fuerza de *gravitación universal*. Aunque sus contemporáneos sabían que la fuerza gravitacional debería tener una dependencia proporcional al inverso del cuadrado de la distancia, ninguno de ellos la pudo formalizar matemáticamente como lo hizo Newton.

La segunda ley es la ley fundamental de la dinámica, pues describe, precisamente, que la fuerza provoca cambios (aceleraciones) en el estado de movimiento de los objetos, es decir, relaciona la fuerza con el efecto que ésta tiene en el estado de movimiento de cualquier objeto. Con sus tres leyes y la ley de gravitación universal, Newton pudo deducir, por primera vez, el movimiento elíptico de los planetas alrededor del Sol, unificando la dinámica de los cielos y de la Tierra en una sola teoría. También pudo explicar la caída de los cuerpos que había estudiado Galileo, las mareas de los océanos y muchos otros fenómenos. El estudio de los sistemas dinámicos nace formalmente con la teoría newtoniana.

Newton trajo orden al universo, prescindiendo de cualquier intervención divina, y lanzó la ciencia a un camino de avances con un ritmo extraordinario, proponiéndose retos cada vez más ambiciosos. Por supuesto, la teoría newtoniana causó gran admiración y desencadenó un cambio en la cosmovisión de su época que, a partir de ese momento, se caracterizaría por el *determinismo*. Tan sólo un siglo después, en 1776, el brillante matemático Pierre Simon Laplace afirmaba que si se conocieran las condiciones iniciales de todas las partículas en el universo en un instante dado se podría predecir, en principio, su pasado y futuro, poniendo en duda la existencia del libre albedrío. Las potentes computadoras del siglo XXI podrían hacernos pensar que nos acercamos, en principio, a ese “magnífico” objetivo pero, como veremos, no todo es miel sobre hojuelas.

Después del éxito obtenido en resolver el problema de dos cuerpos que se atraen gravitacionalmente, Newton se propuso resolver el *problema de los tres cuerpos*. Este consiste en describir el movimiento de un sistema formado por tres astros o cuerpos que interactúan gravitacionalmente, como es el caso de la configuración Sol-Tierra-Luna, o planeta-luna-anillos y otras configuraciones del Sol, planetas, lunas, etc. A pesar de su singular capacidad y arduo trabajo, Newton no logró prosperar debido a la gran dificultad matemática del problema.

En el siglo XVIII, Euler y Lagrange lograron encontrar soluciones particula-

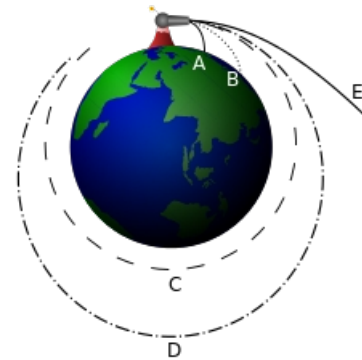


Figura 5: Cañón de Newton. La gravedad actúa sobre los objetos terrestres (bala) y sobre los astros: la luna “cae continuamente”.

res cuando los tres cuerpos se mueven colinealmente o manteniendo un triángulo equilátero. Pero la solución global al problema de tres cuerpos (y en general para n cuerpos) quedó abierta a pesar de los intentos, sin éxito, de físicos y matemáticos del más alto nivel. El dicho de que “tres son multitud” se dejó sentir. Aunque los intentos por resolver este problema eran siempre infructuosos, existía la idea generalizada de que con el tiempo se lograría el objetivo y el optimismo y confianza en el determinismo de Laplace prevaleció por más de 120 años.

El interés en el problema de tres cuerpos revivió cuando, en 1885, Mittag-Leffler anunció un concurso para conmemorar al rey Oscar II de Suecia por su 60 aniversario, a celebrarse el 21 de enero de 1889, invitando a los mejores matemáticos de la época a participar en 4 temas propuestos. El más importante de ellos era el problema de tres o n cuerpos de la mecánica celeste, que se había resistido, desde Newton, a su solución.

El objetivo del concurso era encontrar una solución explícita en términos de funciones conocidas dependientes del tiempo. Estaba permitido darla como una suma o serie, siempre y cuando la suma no creciera infinitamente. Matemáticamente se dice que la suma sea convergente. El estudio se abordaba mediante las llamadas *teorías de perturbaciones*, del problema resuelto de Kepler,³ pero todas las desarrolladas hasta ese momento eran divergentes, debido al famoso problema de las *resonancias*.

Las soluciones divergentes introducían divisores cero, o que podían ser tan pequeños como se quisiera, resultando en sumas divergentes. La resonancia es un fenómeno muy común. Pensemos, por ejemplo, cuando nos mecemos en un columpio. Si nos empujan en el momento adecuado, el balanceo aumenta cada vez más, pero si el impulso está *desincronizado* con el balanceo, entonces no hay un efecto reforzador. Lo mismo ocurre con, por ejemplo, un asteroide girando alrededor del Sol, que siente los *jalones* gravitacionales de Júpiter, que pueden estar sincronizados con el movimiento del asteroide y generar grandes efectos. De ahí resultaban las series matemáticas divergentes ineludibles.⁴

El jurado del concurso, formado por Weierstrass, Hermite y Mittag-Leffler, decidió otorgarle el premio al matemático Henri Poincaré, de 35 años, por su estudio sobre el *problema restringido circular y plano de tres cuerpos*. Si bien no obtuvo la solución global pedida, su aportación fue sumamente innovadora, confiriéndole a Poincaré un gran prestigio internacional y la publicación de sus memorias en el *Acta Mathematica* de 1890.

El empeño y enorme creatividad con que realizó su trabajo durante el concur-



Figura 6: Henri Poincaré (1854-1912).

³ Se buscaban soluciones *cercanas* a las conocidas de Kepler.

⁴ Nuevamente, el infinito aparece en las matemáticas como un reto difícil de resolver, pero es también una oportunidad para un avance importante de la ciencia.

so dieron lugar al surgimiento de nuevos métodos geométricos y cualitativos sumamente novedosos en las matemáticas. Los métodos cualitativos le permitieron descubrir, por primera vez, un comportamiento nunca antes visto en la ciencia: el *caos*. Poincaré no utilizó ese nombre, pero descubrió que en el sistema dinámico de los tres cuerpos, había soluciones tan complejas que era imposible darlas explícitamente, debido a la existencia del *enredo homoclínico*, como él le llamó. Comprendió que en el enredo homoclínico la solución tiene una gran dependencia de la condición inicial, aspecto que, como veremos, caracteriza al caos.

Pero poca gente comprendió a profundidad la complejidad de las soluciones en el enredo homoclínico. Quizá estas ideas llegaron demasiado pronto y no existían los medios para explotarlas. En 1900, Planck propuso la cuantización de la energía y, en 1905, Einstein publicó su trabajo de relatividad especial. La mecánica cuántica introdujo el azar de una forma intrínseca, entonces, ¿para qué hablar de caos debido a las condiciones iniciales? Así, el interés de la comunidad científica se volcó hacia las nuevas teorías de la mecánica cuántica y la relatividad, mientras que la investigación iniciada vigorosamente por Poincaré se frenó después de su muerte, en 1912.

Fue hasta 1963 cuando el meteorólogo Edward Lorenz, con ayuda de las computadoras, redescubrió la dinámica caótica mientras estudiaba numéricamente un modelo de convección atmosférica. Para su sorpresa, observó que pequeñísimas diferencias en las condiciones iniciales, se magnificaban enormemente con el tiempo, dejando soluciones completamente diferentes, muy parecidas a las que Poincaré había encontrado en la mecánica celeste.

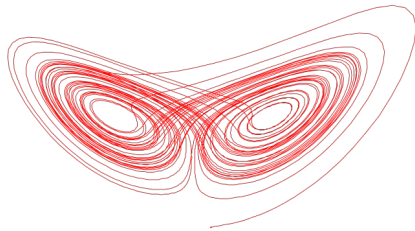


Figura 7: Atractor extraño de Lorenz.

Su comportamiento resultó sumamente extraño, y al dibujar la solución obtuvo la popular imagen parecida a las alas de una mariposa. Lorenz comprendió que la predicción del clima con su modelo era imposible, pues requería un conocimiento perfecto de la temperatura, humedad, etc. Lo más que podría hacer con su modelo son predicciones del clima a muy corto plazo. Aún con modelos más sofisticados y enormes computadoras para resolverlos, el clima sólo se predice para unos cuantos días, en el mejor de los casos.

EL CAOS EN LA FÍSICA

EL CAOS EN LA FÍSICA

Pero, ¿qué es el caos? En el griego más antiguo *caos* significa espacio que se abre o hendidura, pero en algunas cosmogonías antiguas significaba el estado amorfo e indefinido anterior a la ordenación del cosmos. Su significado coloquial actual es de confusión y desorden. Pero en la ciencia, y específicamente en los sistemas dinámicos, tiene un significado muy concreto y bien definido. Sus orígenes están

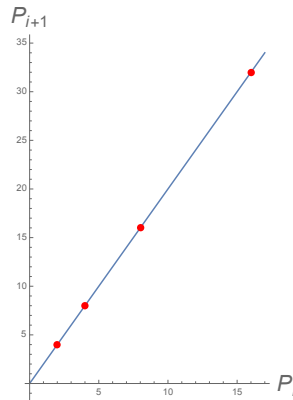


Figura 8: Modelo lineal: la población se duplica cada año. Población actual en el eje horizontal, población del siguiente año en el eje vertical.

en los complejos comportamientos descubiertos por Poincaré, y redescubiertos en la década de los setenta del siglo XX, cuando se convirtió en uno de los campos de investigación con mayor dinamismo.

En el ámbito científico el término *caos* fue acuñado por James Yorke en 1975, y es el tema que nos ocupa en este capítulo. También veremos su diferencia con el azar y las implicaciones que tiene en cuanto a la predicción. ¿Puede haber caos en los sistemas deterministas?, ¿no es precisamente la capacidad de predicción lo que caracteriza a la ciencia?, ¿hasta dónde llega esta capacidad en los sistemas con caos? Estas y otras preguntas las contestaremos a continuación.

EL ENCANTO DE LOS SISTEMAS NO-LINEALES

Aunque originalmente el caos surgió en el complicado problema de tres cuerpos, puede observarse y estudiarse en sistemas sorprendentemente simples. El ingrediente esencial para que se presente el caos es la *no linealidad*.

Los modelos más estudiados a lo largo de la historia han sido los lineales, por ser los que se pueden resolver con cierta facilidad de manera completa. René Descartes propuso el método analítico, dividir el todo en sus partes e ir ascendiendo en el estudio de lo más complejo, mediante la comprensión de sus componentes más simples. La característica más importante de los sistemas lineales es que el todo es la suma de las partes.

Pero en la naturaleza no siempre es así, en realidad casi nunca es así. Los sistemas no lineales no tienen esa propiedad y muchos fenómenos de nuestra vida cotidiana tampoco, así que es de esperar que la mayoría de los sistemas los debamos estudiar con modelos no lineales. Es entonces fundamental que comprendamos la diferencia entre el reduccionismo lineal y la gran riqueza de los sistemas no lineales.

Un sistema lineal se modela mediante ecuaciones que dependen proporcionalmente de la variable de estado del sistema y, posiblemente, de sus derivadas. No se admiten cuadrados, potencias, cocientes, funciones trigonométricas, etc., únicamente la función lineal que satisface la ley de proporcionalidad. De lo contrario, se dice que el sistema es no lineal. Por ejemplo, las pequeñas oscilaciones del candil que observó Galileo en la catedral de Pisa son lineales y se describen con la ley de Hooke: la fuerza es proporcional al pequeño desplazamiento del candil.

Para comprender la diferencia entre los fenómenos lineales y los no lineales, veamos dos ejemplos clásicos de crecimiento poblacional en biología: uno lineal y otro no lineal conocido como logístico.

Primero veamos el caso lineal: supongamos que una población de peces en una laguna se duplica cada año. Queremos saber cuántos peces habrá en las siguientes generaciones año por año. Si, por ejemplo, en una laguna empezamos con una población de $P_0 = 2$ peces,⁵ al año siguiente habrá $P_1 = 4$ peces, al siguiente año 8, luego 16, etc. En general, en la $(i + 1)$ generación el número de peces será el doble de la población en la generación anterior i . Esto lo podemos escribir de manera sencilla como $P_{i+1} = 2P_i$, que indica matemáticamente la ley de "la población actual es proporcional a la anterior, con la constante de proporcionalidad 2". El rápido crecimiento del modelo lineal es *geométrico*, y la gráfica de P_{i+1} versus P_i , en nuestro modelo lineal, es una línea recta con pendiente 2 (ver figura 8).

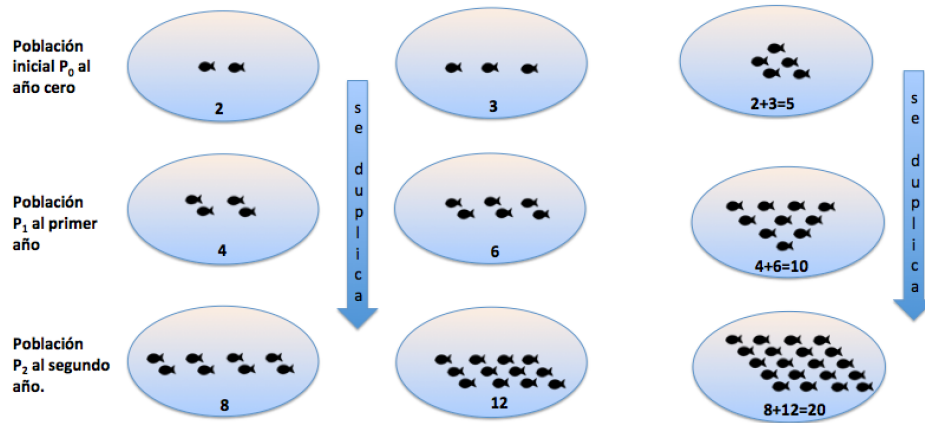
Por otro lado, supongamos que en otra laguna hay inicialmente 3 peces. A los 2 años habrá 6, luego 12, 24, etc., duplicándose cada generación. Pero si, en vez de que estuvieran separados en dos lagunas, empezaran juntos los 5 peces en una sola laguna, crecerán también duplicándose, resultando en 10, 20, 40, ... peces en las próximas generaciones. Observamos que la población total es la misma que si sumáramos las poblaciones antes separadas: $5=2+3$, $10=4+6$, $20=8+16$, etc., como vemos en la figura 9.

Esta es la característica distintiva de los sistemas lineales, el todo es la suma de sus partes. Esta afirmación suena bastante aceptable y es el principio en que se fundamenta el reduccionismo cartesiano. Pero es poco realista, pues en unos cuantos años los peces ya no cabrían en la laguna, ¿se desbordarían? No, pues antes morirían por falta de los recursos esenciales para vivir: comida, oxígeno, espacio, etc.

Un modelo más realista debería tomar en cuenta una tasa de crecimiento y de mortandad, así como la competencia entre los peces por los recursos, cuando crezca mucho la población, pues el hábitat soporta un número máximo de individuos, lo que se denomina *capacidad de carga*. El *modelo logístico* es un modelo no lineal que toma en cuenta estos aspectos y la gráfica de P_{i+1} versus P_i tiene forma de parábola invertida (ver figura 10). Este modelo contiene la información de que si la población es pequeña el número de peces aumentará, pues no hay competencia entre ellos, pero el crecimiento disminuye conforme se acerca al límite máximo que soporta el hábitat, hasta anularse cuando se alcanza la capacidad de carga.

La figura 10 muestra la gráfica del crecimiento logístico correspondiente a una

⁵ Se lee *pe cero* y el subíndice indica el año al que se refiere la población, en este caso, año cero.



(a) Dos peces y tres peces están inicialmente en 2 lagunas separadas.

(b) Todos inician en una sola laguna.

Figura 9: Modelo lineal. El crecimiento de la población total de peces se obtiene como la suma de los crecimientos de las poblaciones separadas.

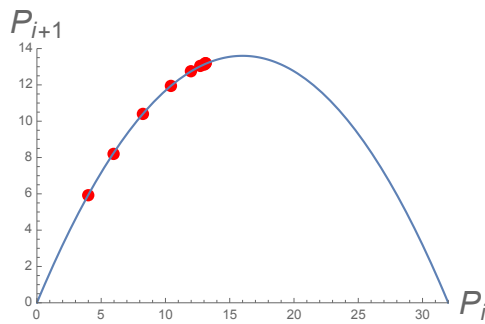
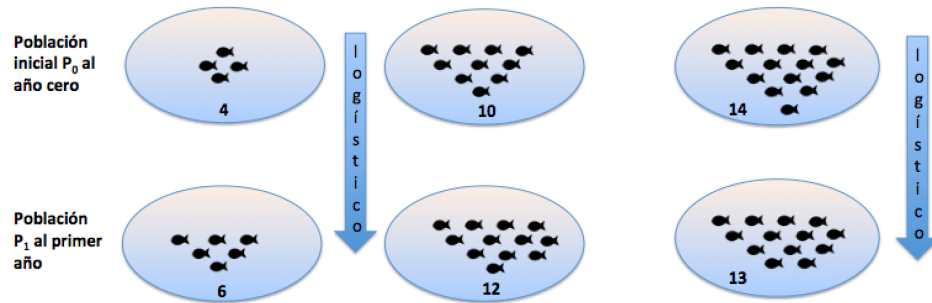


Figura 10: Modelo logístico no lineal para una capacidad de carga de 32 peces, con tasa de nacimiento de 2 y de mortandad de 0.3.



(a) Peces en 2 lagunas separadas con poblaciones iniciales de 4 y 10 peces. (b) Todos juntos en una sola laguna.

Figura 11: Modelo logístico. El crecimiento de la población total de peces no es la suma de los crecimientos de las poblaciones separadas, ya que se trata de un modelo no-lineal.

capacidad de carga de 32 peces, con una tasa de nacimiento de 2 y de mortandad de 0.3. Con ayuda de la gráfica, calculamos cuántos peces habrá si la población inicial es de 4 peces

$$P_0 = 4, \quad P_1 = 6, \quad P_2 = 8, \quad P_3 = 10, \dots$$

Manteniendo los valores anteriores y cambiando únicamente la población inicial a 10 peces obtenemos el siguiente crecimiento

$$P_0 = 10, \quad P_1 = 12, \quad P_2 = 13, \quad P_3 = 13, \dots$$

vemos que la población se estabiliza en 13 peces a partir del tercer año. En la figura 11a mostramos dos lagunas con 4 y 10 peces, por separado, que pasan a 6 y 12 peces, respectivamente, en el primer año.

Un aspecto fundamental en los sistemas no lineales es que el todo ya no es la suma de las partes, como vemos en la figura 11, donde hemos puesto dos lagunas separadas con 4 y 10 peces, respectivamente, y una tercera con los 14 peces juntos. Transcurrido el primer año, hay 6 y 12 peces en las dos lagunas separadas, 18 en total. Pero, si tuviéramos los 14 peces juntos inicialmente en una laguna, siguiendo la ley logística, únicamente habrá 13 peces en el primer año, figura 11b. Es la interacción entre los peces, cuando aumenta la población y compiten por los recursos, la que introduce el efecto no lineal que impide, radicalmente, que podamos dividir al sistema en sus partes y sumar sus resultados como lo podíamos hacer en el sistema lineal.

Cambiando la tasa de mortandad a 0.1, manteniendo los otros valores iguales, obtenemos las poblaciones

$$P_0 = 10, \quad P_1 = 13, \quad P_2 = 15, \quad P_3 = 15, \quad P_4 = 15, \dots$$

Observamos que, a partir de la tercera generación, se alcanza el valor de 15 peces, repitiéndose el mismo valor en las siguientes generaciones. Pero si la tasa de crecimiento es 3 y la de mortandad es 0.5, con la misma población inicial de 10 peces y capacidad de carga de 32 peces, obtenemos el siguiente crecimiento

$$P_0 = 10, \quad P_1 = 17, \quad P_2 = 20, \quad P_3 = 19, \quad P_4 = 19, \dots$$

Evidentemente este modelo tiene mucha más riqueza que el modelo lineal y amerita detenernos a explorarlo.

LO COMPLEJO DE LO SIMPLE Y EL CAOS

El modelo logístico utilizado en la sección anterior lo introdujo por primera vez el biólogo matemático Robert May, en 1971, y tiene una expresión matemática extremadamente sencilla. Lo más interesante es que contiene muchas de las características de los sistemas no lineales, incluyendo el caos o fuerte dependencia de las condiciones iniciales.

Para conseguir la expresión matemática más simple del modelo logístico, R. May ajustó las cantidades de manera que la capacidad de carga fuera 1 (el máximo valor que puede tomar la población) y la población relativa a la capacidad de carga sólo pudiera tomar valores entre 0 y 1, denotada por x_i . Por ejemplo, si $x_i = 0.5$, significa que la población en la i -ésima generación se encuentra a la mitad de su capacidad de carga.

Con esto, el modelo logístico se puede escribir en una forma muy sencilla

$$x_{i+1} = r x_i (1 - x_i). \quad (1)$$

Esto se lee así: "dado un valor x_i , multiplicar el valor de r por el de x_i y al resultado multiplicarlo por lo que resulta de restar uno menos el valor x_i , y obtendremos el nuevo valor x_{i+1} ".

Conocida la población relativa inicial x_0 , podemos calcular las siguientes poblaciones relativas $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ iterando esta función, es decir, introduciendo nuevamente el resultado obtenido, x_1 , en la fórmula para obtener x_2 , y así sucesivamente, repitiendo este proceso n veces. A esos puntos le llamamos la *trayectoria* o la *órbita* de x , con valor o condición inicial x_0 . La ecuación logística es tan sencilla que podemos hacer las operaciones con nuestra calculadora o celular, y nos permite observar algunos importantes hechos de los sistemas dinámicos no lineales.

Por ejemplo, si hacemos $r = 2$ y una población inicial de $x_0 = 0.5$ en el lado derecho de (1), vuelve a darnos el mismo valor: $x_1 = 2 * 0.5(1 - 0.5) = 0.5$ y también los siguientes $x_2 = 0.5, x_3 = 0.5, \dots$. Entonces la población no cambia en las siguientes generaciones, manteniéndose a la mitad del máximo sin cambiar en los siguientes años.

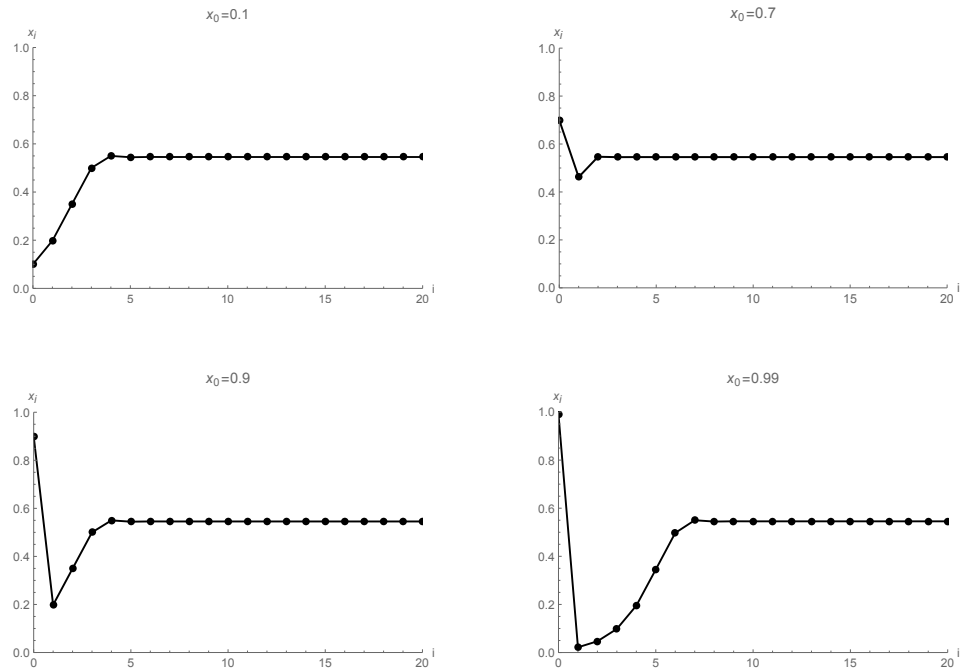


Figura 12: Evolución del mapa logístico cuando $r = 2$ para cuatro valores iniciales diferentes de x_0 : 0.1, 0.7, 0.9, 0.99. En todos los casos 0.5 es el valor final.

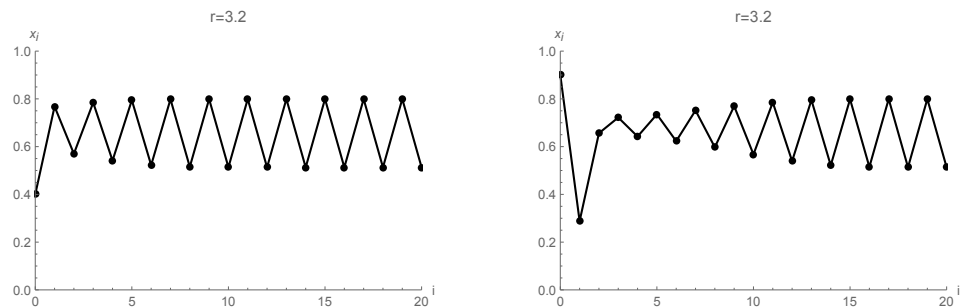


Figura 13: Evolución del mapa logístico cuando $r = 3.2$ para dos valores iniciales $x_0 = 0.4$ y $x_0 = 0.9$. En los dos casos finalmente oscilan entre los dos valores 0.513045 y 0.799455

Si repetimos con una población inicial de 0.1, sin cambiar el valor de r , obtenemos los siguientes resultados

$$x_0 = 0.1, \quad x_1 = 0.18, \quad x_2 = 0.2972, \quad x_3 = 0.416114, \\ x_4 = 0.485926, \quad x_5 = 0.499604, \quad x_6 = 0.5, \quad x_7 = 0.5, \dots$$

también llegamos al valor de 0.5 y la población ya no cambia, pero hay que dejar pasar 6 generaciones para alcanzar este valor. Al valor 0.5 le llamamos un *punto fijo* porque, una vez que se llega a él, ya no cambia en las siguientes generaciones. Es práctico graficar estos resultados porque nos permite visualizar fácilmente cómo evoluciona la población. En la figura 12 mostramos, para el valor $r = 2$, la gráfica de las poblaciones partiendo de cuatro diferentes valores iniciales. Observamos que para cualquier población inicial (diferente de 0 y 1), se llega finalmente al valor 0.5. Este valor final *atrae* a todas las soluciones del sistema y, por lo tanto, decimos que el punto fijo 0.5 es un *atractor*.

Si ahora cambiamos ligeramente a $r = 2.2$, obtenemos un comportamiento similar con una única diferencia: el punto fijo que atrae a todas las soluciones tiene un valor diferente (0.545455). Pero si r es menor que 1 y mayor que cero, el punto fijo atractor es el valor cero, indicando que, sin importar cuál sea el valor inicial x_0 , la población eventualmente se extinguirá.

Ahora cambiaremos al valor $r = 3.2$ y las cosas se pondrán interesantes. Con las condiciones iniciales de 0.4 y 0.9, obtenemos las gráficas de la figura 13. Vemos que ambos valores iniciales terminan en dos valores que se alternan: 0.513045 y 0.799455; el primer valor lleva al segundo, mediante la ecuación logística, y viceversa. De hecho, la población oscila entre esos 2 valores, independientemente de cuál sea la población inicial.

En este caso, el atractor no es un punto fijo sino dos puntos que se alternan, oscilando entre uno y otro. A esos puntos les llamamos *órbita periódica* de periodo 2, pues cada dos generaciones se regresa a la misma *población*. Por otro lado, cuando hay un cambio drástico cualitativo en la dinámica del sistema, decimos que hay una *bifurcación*. Cuando ocurre una bifurcación en algún valor de r , un punto que era atractor deja de serlo y se vuelve un punto que rechaza o *repele* a las soluciones y se le llama, entonces, *inestable*.

Continuemos explorando lo que ocurre al aumentar r . Hay un valor de r entre 3.4 y 3.5 donde vuelve a ocurrir un cambio cualitativo importante, otra bifurcación. Cuando $r = 3.5$, eventualmente el sistema es atraído a 4 valores distintos, independientemente del valor de x_0 . Decimos que el atractor es una *órbita de periodo 4*, pues después de 4 generaciones se repiten los mismos valores de la población. En la figura 14 tomamos dos condiciones iniciales diferentes, $x_0 = 0.4$ y $x_0 = 0.9$. Para otros valores iniciales, pueden ser diferentes los tiempos que toma alcanzar la órbita periódica de periodo 4, pero todos llegan, eventualmente, a esa solución.

Si continuamos aumentando el valor de r , volvemos a observar que en algún valor de r , entre 3.54 y 3.55, se duplica el periodo del atractor de 4 a 8, después cerca de $r = 3.565$ se duplica el periodo de 8 a 16 y, así, continúa duplicándose el periodo una y otra vez en una "cascada de bifurcaciones". El valor de r con la siguiente

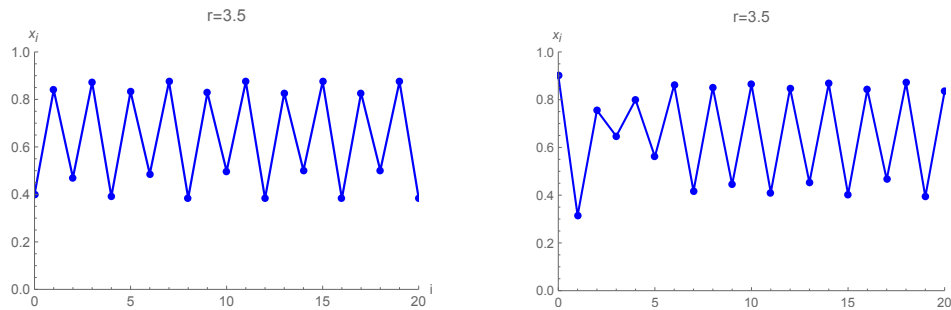


Figura 14: Evolución del mapa logístico cuando $r = 3.5$ para dos valores iniciales $x_0 = 0.4$ y $x_0 = 0.9$. Ambos son atraídos por una órbita periódica de periodo 4.

bifurcación se encuentra cada vez más cercano y, en algún momento, ¡el periodo llega a ser infinito! Esto ocurre aproximadamente en el valor $r_\infty = 3.569946$. ¿Pero qué significa que el periodo es infinito? Significa que dejamos de ver oscilaciones periódicas en la población final, la solución se mueve, de un punto a otro, entre 0 y 1 sin repetirse en ningún momento. El atractor deja de ser una órbita periódica y se vuelve un objeto extraño llamado precisamente *atractor extraño*. Este atractor *jala*, atrayendo hacia él, a las trayectorias, al mismo tiempo que los infinitos puntos inestables repelen a las trayectorias, resultando todo ello en una *mezcla* muy enredada de la dinámica.

Ahora, realizemos el cálculo, para 50 iteraciones, con un valor $r = 3.99$ y dos condiciones iniciales x_0 muy cercanas que difieren en una milmillonésima, por ejemplo $x_0 = 0.4$ y $x_0 = 0.400000001$, y les aplicamos la ecuación logística. En este caso, necesitamos realizar las operaciones con mayor precisión, aquí las hicimos con 15 dígitos y graficamos el resultado en la figura 15.

Observamos que en la generación 25, las soluciones comienzan a separarse cada vez más y dejan de tener cualquier parecido después de 30 generaciones. Esto ocurre con cualesquiera dos condiciones iniciales muy cercanas pero no idénticas. Sus valores se mueven, primero, muy cercanos uno del otro, pero, eventualmente, se empiezan a separar y dejan de tener cualquier correlación, moviéndose de una manera *caótica*. El atractor tiene un comportamiento tan extraño que se le llama por eso *atractor extraño* o *atractor caótico* y, entonces, el caos se manifiesta como una *dependencia sensitiva a las condiciones iniciales*.

Si usamos el valor $r_\infty = 3.569946$, la divergencia de las trayectorias cercanas es muy lenta, en cambio, cuando $r = 3.99$, las trayectorias divergen muy rápidamente. El efecto del *mezclado* de las trayectorias caóticas viene del confinamiento de las soluciones sometidas a los *jalones* del atractor y a los *empujones* de las órbitas inestables.

Es importante destacar que no hemos introducido ningún elemento de azar en la variable x , y que la regla con que evoluciona el modelo logístico es determinista, pues está perfectamente definida en la ecuación (1). El caos que surge es inherente

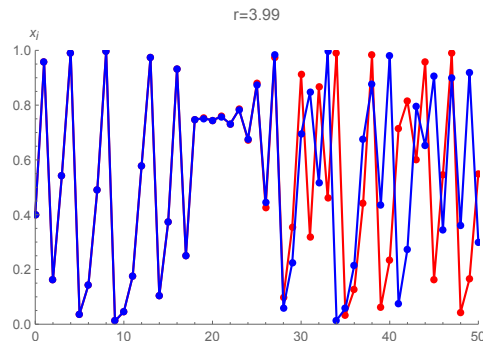


Figura 15: Modelo logístico con $r = 3.99$. Evolución de dos trayectorias con valores iniciales muy cercanos: $x_0 = 0.4$ y $x_0 = 0.400000001$. En 30 generaciones no tienen ninguna correlación.

al modelo no lineal. Para los valores de r que tienen un atractor extraño o caótico, cualquier diferencia en algún dígito del valor inicial, ya sea debido a la precisión limitada de la computadora o a la precisión limitada en la medición de la población, eventualmente terminará por magnificarse tanto que no podremos predecir la dinámica a partir de algún momento; la capacidad de predicción en el largo plazo, e incluso en tiempos cortos, se pierde debido a la fuerte dependencia de las condiciones iniciales.

Para destacar la diferencia entre la dependencia sensitiva de las condiciones iniciales y el azar, a esta incapacidad de predicción de un modelo se le llama *caos determinista* o simplemente caos. Sin embargo, la dinámica caótica es tan compleja que el propio modelo logístico se utiliza como un generador de números pseudoaleatorios.

CUANTIFICANDO EL CAOS

Podemos cuantificar el caos midiendo qué tan rápidamente divergen las soluciones cercanas. Puesto que la divergencia de las soluciones cercanas es exponencial, nuestra capacidad de predicción se mide con el llamado *exponente de Lyapunov*. Si el exponente de Lyapunov es negativo, las trayectorias cercanas no divergen sino que se van acercando conforme pasa el tiempo y no hay caos. Este fue el caso en los atractores de tipo punto fijo y órbitas periódicas oscilatorias. Pero cuando el exponente de Lyapunov es positivo, las trayectorias cercanas divergen exponencialmente, y su valor nos permite saber hasta dónde podremos hacer predicciones: entre mayor es el exponente de Lyapunov, menor es nuestra capacidad de predicción.

Hay dos propiedades en el modelo logístico que introducen cierto *orden* en el caos porque son comunes a muchos sistemas dinámicos caóticos. La primera propiedad es la llamada *ruta al caos por la duplicación del periodo*, que de manera sintéti-

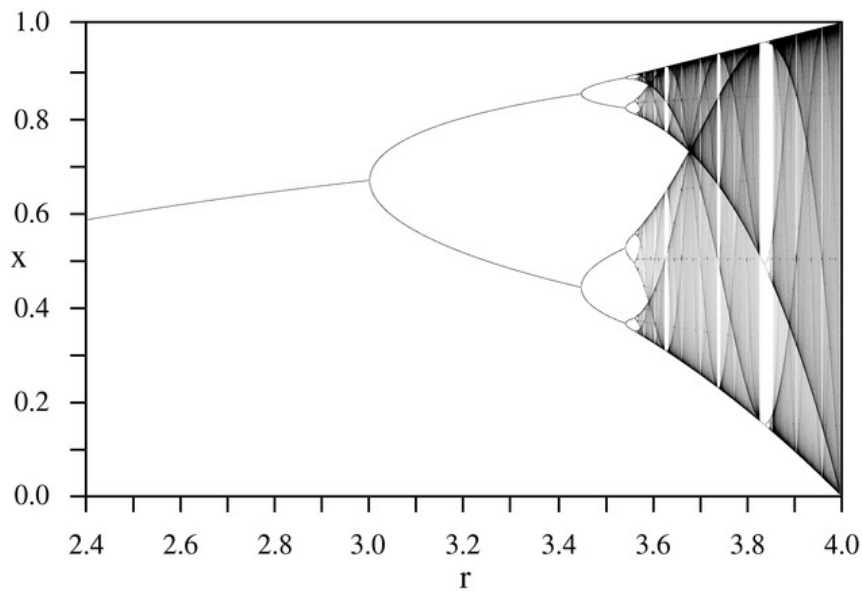


Figura 16: Diagrama de bifurcaciones del mapa logístico. En el eje vertical se muestran los valores del atractor para cada valor del parámetro r en el eje horizontal.

ca mostramos en la figura 16 con un *diagrama de bifurcación*: en el eje horizontal se coloca el valor de r , que se llama el *parámetro*, y en el eje vertical los valores del atractor final. Cuando $r = 2$, el atractor final es un punto fijo en 0.5. Cuando $r = 2.4$ el sistema es atraído al valor final 0.583333. Pero cuando r es aproximadamente 3, hay un cambio cualitativo importante, aparece una bifurcación con un atractor de periodo 2. Cuando $r = 3.2$, la solución final oscila entre dos valores 0.513045 y 0.799455. Después vuelve a ocurrir otra bifurcación con un atractor de periodo 4, después de periodo 8 y, así, sucesivamente. Se tiene una cascada de bifurcaciones de periodo doble del anterior. En el diagrama, las bifurcaciones se ven como horquillas que emanan de las ramas de otra horquilla.

Un hecho sorprendente es que esta ruta al caos, por duplicación del periodo, la tienen todos los sistemas dinámicos unidimensionales con un sólo máximo, como la parábola que representa la ecuación logística; estas funciones se les llama *unimodales*.

La segunda propiedad del mapa logístico, que comparte con todos los sistemas dinámicos unimodales, la descubrió el físico Mitchel Feigenbaum, en 1975. Feigenbaum calculó los valores donde ocurren la primera, segunda, ..., n -ésima bifurcación y observó que los valores de r resultaban cada vez más cercanos, apretándose cada vez más conforme se acercaban al valor $r_\infty \approx 3.569946$. Entonces calculó las razones de bifurcación, es decir, la proporción entre la distancia de r , en que ocurría una bifurcación, y la siguiente, resultando un valor aproximadamente constante

de 4.6692016, conocido como la *constante de Feigenbaum*. No deja de sorprender que esta propiedad, y la ruta al caos, por duplicación del periodo, están presentes en todos los sistemas dinámicos unimodales, resaltando cierta universalidad en todos ellos. Por esto se dice que estas son *propiedades universales*. Aparentemente, sólo se trata de propiedades matemáticas pero, muy sorprendentemente, no es así: la secuencia de bifurcación del periodo se ha observado experimentalmente en procesos biológicos, químicos y físicos. Y aunque sólo pueden observarse unas cuantas bifurcaciones, la razón de los valores del parámetro entre bifurcaciones se aproxima mucho al valor de la constante de Feigenbaum.

COMPLEJO Y COMPLICADO, CAOS EN EL SISTEMA SOLAR

Hemos visto cómo surge el caos en un sistema tan simple como el modelo discreto logístico, caracterizado por la fuerte dependencia de las condiciones iniciales. Volvamos ahora a lo que ocurre en los sistemas continuos, como los descritos por la segunda ley de Newton.

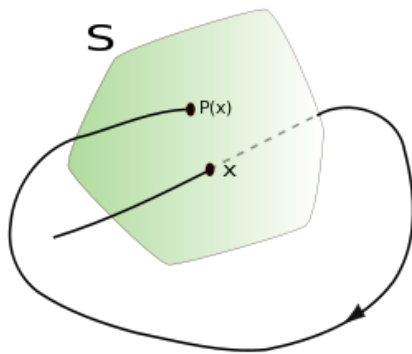


Figura 17: Mapa de retorno de Poincaré.

Regresemos, con Poincaré, al problema que dio origen por vez primera al concepto de caos, para entenderlo ahora desde la perspectiva de la dinámica newtoniana del problema de los tres cuerpos. Desde luego que hay una enorme diferencia en cuanto al modelo mismo, éste es mucho más complicado que el logístico porque involucra ecuaciones diferenciales y terminología, en general, más especializada; el problema de tres cuerpos es continuo y el modelo logístico es discreto; el primero no tiene atractores y el segundo sí; uno viene de la mecánica celeste y el otro es de la biología. No obstante tantas diferencias, veremos que tienen similitudes.

Poincaré describe el estado del sistema mediante un punto en el *espacio fase*, donde están todas las coordenadas y momentos del sistema. Este punto se mueve o fluye cuando el tiempo transcurre, y contiene toda la información del sistema pues nos dice dónde y cómo se está moviendo el sistema en cada momento.

El camino o trayectoria que traza el punto en el espacio fase representa la evolución del sistema, que parte de ciertas posiciones y velocidades iniciales (condiciones iniciales), y el conjunto de todos esos caminos nos da una representación cualitativa de todo lo que puede sucederle al sistema.

Para simplificar la visualización del fluido fase, Poincaré introdujo los *mapas de retorno* (ahora llamados mapas de Poincaré, figura 17), estudiando rebanadas de las trayectorias fase a través de un plano fijo llamado *sección de Poincaré*, como la

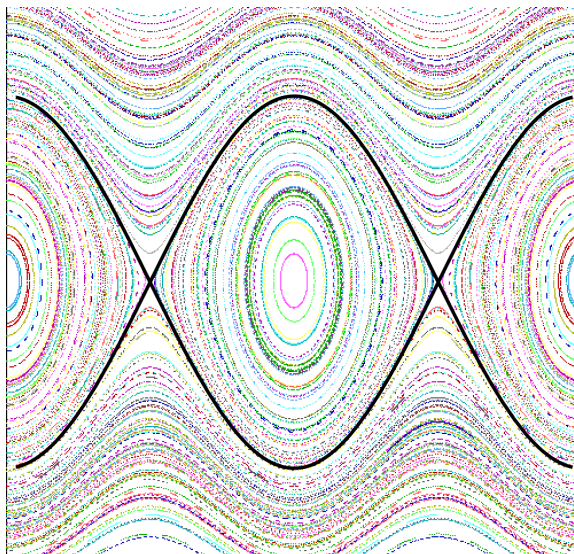


Figura 18: Mapa de Poincaré cerca de una resonancia. La separatriz es la curva sólida gruesa.

rebanada S de la figura. Al cruzar la trayectoria por la sección de Poincaré, deja su huella y van quedando puntos marcados como $x, P(x), \dots$ etc. La ventaja de estudiar la rebanada es que disminuye la dimensión del problema permitiendo visualizar más fácilmente el fluido fase. En el problema restringido circular y plano de 3 cuerpos, el flujo se mueve en 3 dimensiones y la sección de Poincaré muestra una rebanada en 2 dimensiones del flujo tridimensional.

En el concurso para festejar al rey Oscar II, que comentamos en la pag. 53, Poincaré buscaba una solución explícita al problema restringido de tres cuerpos en términos de una suma o serie convergente de funciones conocidas del tiempo. En su demostración, Poincaré creyó haber encontrado una condición que lo llevaba a obtener la serie convergente buscada. Pero estaba equivocado y, desafortunadamente, se dio cuenta de su error ya que había ganado el concurso y recibido el premio. Tuvo que utilizar las 2500 coronas que había recibido como premio y casi 1000 más para pagar la reimpresión del *Acta*. Estaban en juego la reputación del premio real, la de la revista y la de él mismo.

La dificultad venía de que, al estudiar mediante su mapa de retorno un problema de Kepler ligeramente perturbado, invariablemente surgían problemáticas resonancias que introducían divisiones por cero con una dinámica parecida a la de un péndulo. Poincaré había asumido que en el mapa de retorno, cerca de las resonancias, unas curvas llamadas *separatrices* se debían unir suavemente, formando una sola curva, como las líneas sólidas que forman cruces en la figura 18.⁶ Pero revisando los detalles finales de la edición del *Acta*, y tratando de aclarar estas unio-

⁶ Los puntos donde se cruzan las líneas sólidas son trayectorias periódicas.

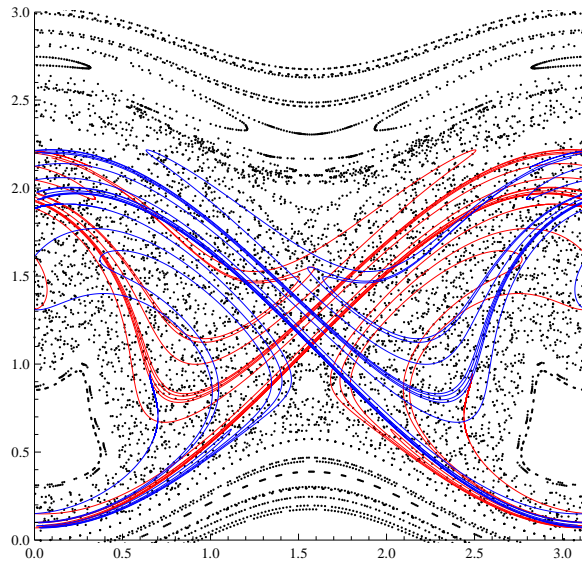


Figura 19: Mapa de Poincaré y parte del enredo homoclínico.

nes suaves y otros puntos dudosos que encontró el señor Phragmén, el corrector de la revista, Poincaré comprendió que esa suposición era un caso excepcional. Lo más general y probable sería que las separatrices se intersecaran. ¡Pero mostró que una intersección implicaba infinitas intersecciones! Poincaré les llamó *intersecciones homoclínicas*, y comprendió su extrema complejidad, que describió en su famosa frase, en el tercer tomo de los *Méthodes Nouvelles de la Mécanique Céleste*:

La complejidad de esta figura es tan impresionante, que ni siquiera intentaré dibujarla. Nada es más adecuado para ilustrar la naturaleza tan compleja del problema de tres cuerpos y de todos los problemas de la dinámica en general.

Con ayuda de las computadoras, hoy podemos calcular y dibujar unas cuantas intersecciones homoclínicas en una sección de Poincaré, como las intersecciones mostradas en la figura 19. No es difícil adivinar por qué se le llama el *tangle* o *enredo homoclínico*, y se comprende que todos los esfuerzos por encontrar alguna función que se ajustara a una solución en el enredo homoclínico serían infructuosos.

Los intentos de Poincaré por corregir el error, en medio de una gran presión pues la versión errónea de las memorias ya estaba impresa, lo llevaron a uno de los descubrimientos más sorprendentes de todos los tiempos: el caos determinista.

La dinámica del problema de tres cuerpos sigue las ecuaciones deterministas de Newton, pero las soluciones son tan complejas que cualquier incertidumbre en la medición de las posiciones y velocidades iniciales del sistema, por insignificante que sea, puede resultar en errores inmensos al predecir sus valores en tiempos largos. La característica distintiva del caos es la fuerte dependencia de las condiciones iniciales, por el estiramiento y doblamiento de las soluciones en sí mismas.

Las trayectorias resultantes divergen exponencialmente, aunque estén acotadas, y el flujo fase se *mezcla* en la región caótica pues una dirección estira las soluciones mientras que otra las encoge.

Muchas décadas después, Lorenz observó el comportamiento caótico en su modelo atmosférico, mientras que May hizo lo propio en el modelo logístico que exploramos en la sección anterior. El problema de tres cuerpos y el modelo logístico pueden presentar la característica común de una fuerte sensibilidad a las condiciones iniciales, aunque son modelos matemáticos muy diferentes que describen sistemas muy diferentes: cuerpos gravitacionales uno y poblaciones el otro. En el problema de tres cuerpos, hay que destacar una característica importante del caos:⁷ no proviene de atractores extraños (pues no los tiene) sino del enredo homoclínico. Pero, como en el modelo logístico, el movimiento puede ser extremadamente irregular y sensible a las condiciones iniciales.

El problema restringido circular y plano de tres cuerpos fue el primer ejemplo determinista con movimiento caótico, aunque la terminología de *caos* se utilizó por primera vez hasta 1975 por James Yorke. En la figura 19 calculamos parte del enredo homoclínico en otro subsistema del sistema solar: un modelo para estudiar la rotación⁸ de Hyperión, una luna bastante asimétrica de Saturno, que da tumbos caóticos. Es interesante que en el sistema solar, paradigma de movimiento regular predecible, tengamos este ejemplo observable de caos, y hay muchos otros.

Ahora vemos que el sueño de Laplace de predecir *completamente* el futuro no es posible, sin importar cuán grandes sean los avances de la tecnología ni cuán potentes y desarrolladas consigamos hacer las computadoras. La condición inicial debería conocerse experimentalmente con precisión infinita y todos los cálculos realizarse con precisión infinita, pero ninguna de las dos cosas son realizables. La dificultad está en la palabra *completamente*. Podemos hacer predicciones, ¿pero hasta qué punto? Veamos, en la siguiente sección, estos aspectos interesantes sobre la predicción.

PREDICCIÓN EN SISTEMAS CAÓTICOS

El comportamiento caótico es aparentemente aleatorio y surge en los sistemas deterministas sin que hayamos introducido ninguna fuente aleatoria en el sistema. En la ciencia, caos no significa desorden ni azar, sino “fuerte sensibilidad a las condiciones iniciales”. De hecho, hay un orden implícito en el algoritmo que indica cómo calcular el siguiente valor, partiendo del actual, ya sea en el modelo logístico o en las ecuaciones dinámicas de Newton. Hay, además, un orden asociado a las propiedades universales del caos determinista en el modelo logístico (y en los mapas unimodales). Por todo ello, con justa razón, el Dr. Walter Rittler ha expresado:

Lo no predecible se ha convertido en un hecho de la vida, en vez de una aberración como lo considera la física clásica. El caos es concebido como un inagotable océano de información y no como una ausencia vacía de significado.

⁷ Llamado caos en sistemas conservativos o hamiltonianos.

⁸ Nos referimos al giro interno, no a la traslación orbital.

¿Hasta dónde podemos hacer predicciones en los sistemas no lineales? En el modelo logístico puede o no haber caos, dependiendo del valor de r . Si el valor del parámetro r tiene atractores de tipo punto fijo u órbita periódica, podemos saber con gran precisión lo que ocurrirá. Pero cuando el valor de r tiene un atractor caótico, nuestra capacidad de predicción queda limitada a tiempos cortos. Más cortos entre más caótico sea el sistema.⁹ Hay una incertidumbre inherente a nuestras observaciones experimentales en el valor inicial x_0 y, cuanto más grande sea la incertidumbre en la condición inicial, limitamos el horizonte de la predicción a tiempos más cortos.

En cuanto a los sistemas físicos, la segunda ley de Newton es una *ecuación diferencial*, con una sola solución para cada condición inicial. Una vez que especificamos el estado inicial de un sistema, su evolución posterior queda determinada. Pero tenemos las limitaciones de determinar la condición inicial y seguir su evolución exactamente. El sistema solar es un sistema físico muy complejo, con subsistemas que se han modelado con el problema de tres cuerpos (o de n). Hemos podido avanzar mucho estudiando el modelo simplificado del problema restringido circular de 3 cuerpos para entender mejor la dinámica de sistemas como Sol-Tierra-Luna, o Tierra-Luna-satélite, o Sol-Júpiter-asteroides, etc. Pero aún el modelo *simplificado* de tres cuerpos puede tener caos determinista. Como en el caso del modelo logístico, no todas las soluciones son caóticas. Hay soluciones regulares con periodicidad donde podemos predecir muy bien la evolución del sistema de tres cuerpos, a pesar de los errores o incertidumbres inevitables, ya sean experimentales o computacionales, debido a que condiciones iniciales cercanas dan resultados parecidos. Pero también hay soluciones caóticas que sólo nos permiten hacer predicciones en tiempos cortos. ¿Cuán cortos?, depende de la medida del caos para esa condición inicial.¹⁰

En ocasiones, el caos puede ser tan intenso que la dinámica parece aleatoria desde el primer momento. No sólo hay una escala temporal, sino también una escala espacial para que el caos sea perceptible. El caos puede ser microscópico y no afectar el comportamiento global (macro) del sistema.

El problema de tres cuerpos es, en sí, una simplificación. Hay muchos otros cuerpos en el sistema solar: planetas, satélites, cometas y otras masas en el universo, todos ellos interactuando en mayor o menor grado. El problema real siempre es más complejo de lo que nuestros modelos matemáticos proponen, pues al modelar acotamos el sistema, despreciando muchas interacciones que están presentes. Si nuestro modelo es estable, la presencia de otras interacciones pequeñas, que no consideramos, no afectarán demasiado los resultados que obtengamos en nuestro estudio. Pero si no lo es, deberíamos considerar con más cuidado esas *perturbaciones* y modificar el modelo.

Hemos revisado brevemente dos problemas paradigmáticos con caos. Estos fueron estudiados para comprender lo que ocurre en un sistema no lineal, más que para predecirlo. Y hemos descubierto y comprendido mejor el caos con ellos, aun-

⁹ Esto se mide con el exponente de Lyapunov.

¹⁰ Se mide también con el máximo exponente de Lyapunov.

que sigue habiendo mucho por hacer. Casi todos los sistemas de la vida cotidiana son no lineales, con soluciones que pueden ser periódicas, regulares o caóticas. Si el modelo que lo describe es suficientemente realista, tendrá caos en mayor o menor grado y nuestras predicciones estarán acotadas, incluso en ocasiones podrán ser nulas.

Ahora comprendemos porqué no podemos predecir muchos sistemas. Un proverbio árabe dice: “Quien predice el futuro miente, aunque diga la verdad”.

BIBLIOGRAFÍA

- Gribbin, John. 2006. *Así de simple*. Crítica.
- Madrid, Carlos M. 2010. “Historia de la teoría del caos contada para escépticos”. *Encuentros Multidisciplinares*, (34), enero-abril.
Disponible en: <http://www.encuentros-multidisciplinares.org/>
- May, Robert. 1976. “Simple mathematical models with very complicated dynamics”. *Nature*, (261):459–467.
- Mitchell, Melanie. 2011. *Complexity: A Guided Tour*. Oxford University Press.

GÖDEL, EL TEOREMA DE INCOMPLETITUD Y SUS IMPLICACIONES EN LA ARITMÉTICA

Gerardo A. Laguna[‡]
Ricardo Barrón-Fernández[§]

Los recursos del intelecto humano no han sido, y no pueden ser, completamente formalizados [matemáticamente], de tal manera que siempre existirán nuevos principios de demostración a la espera de ser inventados o descubiertos.

Ernest Nagel y James Newman, *Gödel's Proof*.

* * *

PODEMOS decir, con propiedad, que Kurt Gödel es uno de los más grandes matemáticos del siglo XX. Nació el 28 de abril de 1906 en lo que fue Austria-Hungría y ahora es Checoslovaquia. A partir de 1940 y hasta su muerte, el 14 de enero de 1978, trabajó en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton (IAS), donde llegó a trabajar por recomendación de Albert Einstein. Su nombre está asociado a algunos de los más importantes teoremas de la lógica matemática. En particular, en 1930, desarrolló el famoso teorema de incompletitud para la aritmética.

El teorema de incompletitud para la aritmética dice que, en el caso de la aritmética, dado un cierto tipo de sistema formal deductivo, este es completo pero no consistente o, a la inversa, es consistente pero no completo. De hecho, Gödel demostró que es inherentemente imposible encontrar un sistema deductivo para la aritmética que sea, al mismo tiempo, completo y consistente.

Pero, ¿qué se quiere decir cuando se habla de un sistema deductivo completo y consistente? En este capítulo se presenta un breve bosquejo de las ideas detrás del teorema de incompletitud de Kurt Gödel y algunas implicaciones en el ámbito filosófico.

LA ESENCIA DE LAS MATEMÁTICAS

Una definición muy adecuada para las matemáticas es la que la define como una disciplina que obtiene conclusiones mediante implicaciones lógicas, partiendo de cualquier conjunto dado de axiomas o postulados.

[‡] Departamento de Sistemas de Información y Comunicaciones, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Lerma. / g.laguna@correo.ler.uam.mx

[§] Laboratorio de Inteligencia Artificial, Centro de Investigación en Computación, del Instituto Politécnico Nacional. / rbarron@cic.ipn.mx

En este contexto, podemos pensar en los axiomas como los cimientos de una construcción, mientras que los teoremas son las estructuras derivadas a partir de los axiomas, mediante los principios de la lógica. Ernest Nagel y James Newman, en su libro *Gödel's Proof*, emplean una metáfora muy conveniente para transmitir la esencia de las matemáticas.

Se trata de comparar a las matemáticas con el juego de ajedrez. La analogía empieza con los elementos de trabajo: en el ajedrez se cuenta con piezas y casillas, mientras que en las matemáticas con signos elementales. Luego tenemos las combinaciones que son válidas: en el ajedrez tenemos posiciones legales para cada pieza, mientras que en las matemáticas tenemos fórmulas bien construidas. A continuación, es necesario definir las condiciones iniciales de nuestro sistema: en el ajedrez son las piezas colocadas en sus casillas iniciales, mientras que en las matemáticas tenemos a los axiomas. Entonces, aparecen en acción las reglas del juego: en el ajedrez son las reglas para mover cada pieza, mientras que en las matemáticas son las reglas de inferencia o de derivación. Finalmente, tenemos estados que se van obteniendo a partir de todo lo anterior: en el ajedrez tenemos las posiciones que van tomando las piezas, mientras que en las matemáticas tenemos a los teoremas. En este contexto, el registro de la secuencia de pasos que lleva a una pieza de ajedrez de su posición inicial a su posición actual tiene su equivalente matemático en la demostración o prueba matemática.

En resumen, en las matemáticas se emplea una colección de símbolos (un alfabeto) para construir expresiones que son combinaciones válidas de estos mismos signos, de acuerdo a ciertas reglas de inferencia. El proceso de una demostración matemática consiste en tomar como punto de partida alguna expresión asumida como evidentemente verdadera (un axioma) y se aplican las reglas de inferencia para construir expresiones cada vez más elaboradas. La última expresión, obtenida rigurosamente mediante este proceso, se denomina teorema.

Así, un reto matemático interesante es que, partiendo de los axiomas y de las reglas de inferencia del sistema, alguien pueda llegar a la expresión de un teorema conocido (previamente obtenido por algún matemático). Entonces, se dice que el teorema queda demostrado.

Ahora, podemos pasar a definir algunos conceptos importantes. Una proposición (signos en combinaciones válidas) es una expresión que puede ser falsa o verdadera. Tenemos que un sistema deductivo es formal si la validez de una demostración matemática se apoya en la estructura de las proposiciones, más que en la naturaleza del objeto de estudio, y donde las conclusiones necesariamente son una consecuencia lógica de los supuestos iniciales.

También debemos saber que dentro de los sistemas deductivos formales existen proposiciones matemáticas que realizan afirmaciones sobre los elementos del sistema, pero ello no excluye que pudieran existir proposiciones sobre el mismo sistema formal. Estas últimas proposiciones se denominan como proposiciones metamatemáticas, ya que refieren al sistema mismo, como si este fuera visto desde afuera. Por ejemplo, la siguiente expresión:

$$1 + 1 = 2$$

es una proposición matemática de la aritmética. Pero la siguiente:

« $1 + 1 = 2$ es una fórmula aritmética»

es una proposición metamatemática ya que se refiere a la proposición " $1 + 1 = 2$ " que forma parte de un sistema aritmético.

El teorema de Gödel es una obra maestra del ingenio matemático, ya que él pudo arreglárselas para expresar, dentro de un sistema deductivo aritmético dado, no sólo proposiciones matemáticas sino proposiciones metamatemáticas sobre el mismo sistema deductivo. En particular, se propuso expresar, dentro de un sistema deductivo dado, una proposición metamatemática de auto-referencia como la siguiente:

«Esta proposición no tiene demostración»

es decir,

«Esta proposición no se puede derivar a partir de los axiomas y reglas de inferencia del sistema deductivo».

Dado que las proposiciones pueden ser verdaderas o falsas, si esta proposición metamatemática fuera verdadera, entonces existiría una proposición verdadera que no tiene demostración dentro del sistema. En este caso, se dice que el sistema deductivo es incompleto, ya que existen proposiciones verdaderas que no tienen demostración dentro del sistema. Si la proposición fuera falsa entonces, en contra de su declaración, tendría demostración, pero ello implicaría que el sistema puede derivar proposiciones falsas. En este otro caso, se dice que el sistema deductivo es inconsistente, ya que existen proposiciones falsas que pueden ser demostradas o derivadas dentro del sistema.

El teorema de incompletitud de Gödel es muy importante porque, como resultado de éste, se echó por tierra la creencia de que todas las disciplinas de las matemáticas eran completas y consistentes. Ello trajo como consecuencia una nueva perspectiva sobre el alcance real y las limitaciones de las matemáticas y, en particular, de la lógica matemática.

EL LENGUAJE DE LA ARITMÉTICA

Gödel centró su atención en un lenguaje formal propuesto por Bertrand Russell (1872-1970) para la aritmética, en su obra *Principia Mathematica*. La hipótesis central de Russell era que toda la matemática se puede derivar a partir de la lógica.

Vamos por partes, lo primero es disponer de un lenguaje. En general, todo lenguaje se constituye de expresiones que, a su vez, se construyen a partir de los signos elementales de un alfabeto dado. Nosotros, a manera de ejemplo, emplearemos el siguiente alfabeto de 14 signos para disponer de un lenguaje para nuestra aritmética:

1. (paréntesis abierto
2.) paréntesis cerrado
3. | barra para construir números naturales
4. x literal para construir variables
5. + suma
6. \times multiplicación
7. = "es igual a"
8. \neg "es falso que"
9. \wedge "y"
10. \vee "o"
11. \Rightarrow "Si ... entonces"
12. \Leftrightarrow "Si y sólo si"
13. \exists "Existe ... tal que"
14. \forall "Para todo"

Como se indica en la lista anterior, los números naturales pueden ser expresados mediante la repetición de la barra. Por ejemplo, el número 3 se expresaría como |||, mientras que el 5 se expresaría como |||||. Por otro lado, las variables se expresarían repitiendo la literal x tantas veces como lo indique su subíndice. Por ejemplo, la variable x_1 se expresaría simplemente con x , mientras que la variable x_2 se expresaría mediante la secuencia xx . La razón para escoger este alfabeto tan limitado tiene que ver con la simplicidad de nuestras construcciones.

A partir de este alfabeto, es posible construir expresiones o fórmulas y, mediante algunos axiomas y reglas de derivación (en los que no profundizaremos demasiado), también es posible desarrollar demostraciones.

Empezaremos por decir que, en una fórmula, toda variable se considera como un parámetro excepto aquellas precedidas por los calificadores \exists o \forall . Por ejemplo, en la siguiente expresión:

$$x = xx$$

o, de manera económica,

$$x_1 = x_2$$

que se lee « x_1 es igual a x_2 », tiene dos parámetros, es decir x_1 y x_2 . Por el contrario, la siguiente expresión:

$$\forall xx \neg(xx = |||)$$

o, de manera económica,

$$\forall x_2 \quad \neg(x_2 = |||)$$

que se lee «para toda x_2 no es verdad que x_2 es igual a 3», no tiene parámetros, ya que la variable x_2 se encuentra precedida por el calificador \forall y, por ello, no se considera como parámetro.

Hasta aquí, hemos presentado sólo algunos ejemplos de expresiones usando el alfabeto propuesto. No hay que preocuparse demasiado si no se entiende bien lo que expresa cada fórmula, lo importante es saber que cuando una fórmula no tiene parámetros se dice que es una fórmula cerrada. En nuestro sistema aritmético, una fórmula cerrada es, en realidad, una proposición sobre los números naturales y, por lo tanto, puede tener el valor de verdadera o falsa (por ejemplo, $1 + 1 = 2$ es una proposición verdadera, mientras que $2 + 2 = 5$ es falsa).

Existe un último concepto fundamental en el procedimiento que usó Gödel para obtener su demostración: propuso una forma de mapeo donde a cada signo y expresión del lenguaje aritmético le correspondía un único número natural, a la manera de una etiqueta. A estos números se les conoce como números de Gödel. Luego, se concentró en cierta fórmula con un solo parámetro y lo substituyó por el valor del número de Gödel que le correspondía a la misma fórmula.¹

El efecto total fue el de una auto-referencia, ya que se tenía una fórmula cerrada que, siendo una proposición sobre un número natural, en realidad era una proposición metamatemática sobre el mismo sistema deductivo. Esto es así debido a que el número que se pasó como parámetro a la fórmula era precisamente el número de Gödel que le correspondía a esta fórmula.

Antes de continuar, conviene aclarar qué clase de fórmula es esa que escogió Gödel para substituir el parámetro por el número de Gödel de la misma. Vamos por partes. Primero proponemos algo para generar los números de Gödel y, después, hagamos una primera aproximación a la idea de la auto-referencia mediante el estudio de la *paradoja de Ricardo* (así como un equivalente computacional), algo muy similar a lo que usó Gödel.

NÚMEROS DE GÖDEL

De manera similar a como lo hizo Gödel, vamos a proponer una forma de asignar, de manera única, un número entero a cada uno de los signos y expresiones de nuestro lenguaje aritmético. La idea es contar con un algoritmo (un procedimiento definido e inequívoco) para generar estos números y que, además, sea expresable con el lenguaje aritmético propuesto. También es necesario que este procedimiento tenga su inverso, para poder recuperar la expresión aritmética original, también de manera única, a partir de un número entero dado.

Nuestro objetivo es posible si empleamos el resultado de lo que se conoce como el *Teorema fundamental de la aritmética*, que afirma que si un número entero no

¹ Piense, por ejemplo, en la fórmula $y(x) = 2x$ y supongamos que el número de Gödel de esta fórmula es 666. Entonces, se trata de substituir a x por el valor 666, es decir, $y(666) = 2 \times 666$.

es primo entonces es compuesto, por lo que puede ser descompuesto de manera única en factores primos con exponentes asociados.

Recordemos que los números primos son todos aquellos que únicamente son divisibles por 1 y por ellos mismos. Por ejemplo, los primeros cinco números primos son 2, 3, 5, 7, 11. Un número que claramente no es primo es el 8 y puede ser descompuesto, de manera única, mediante el factor primo 2 como sigue $8 = 2^3$.

Para comenzar, asignaremos los primeros números de Gödel a los signos elementales de nuestro alfabeto. Simplemente, decimos que el número de Gödel de cada signo es el cardinal que le corresponde en la lista que presentamos en la sección anterior. Así, el número de Gödel para el signo '(' es 1, mientras que el número de Gödel para el signo \forall es 14.

A su vez, el número de Gödel para una expresión se puede obtener como el número compuesto que resulta del siguiente procedimiento. Primero, se asigna un número primo a cada signo de la expresión, comenzando con el primer signo de la izquierda (al que necesariamente se le asigna el número primo 2). Al siguiente signo, a la derecha, se le asigna el siguiente primo (es decir, el número primo 3) y, así, continuamos en orden ascendente hasta que todos los signos tienen asignado un número primo consecutivo. Hecho esto, se eleva cada número primo de la secuencia a la potencia indicada por el número de Gödel del signo correspondiente. Finalmente se multiplican los factores obtenidos. El valor resultante es el número de Gödel de la expresión dada. Por ejemplo, considere la siguiente expresión en su forma económica:

$$\exists x_1 (x_1 = x_2 + 1)$$

que, al emplear el alfabeto propuesto, queda expresada como sigue

$$\exists x (x = xx + |)$$

Entonces, procedemos a asignar una secuencia con los primeros 10 números primos (dado que la expresión tiene 10 signos elementales) y, finalmente, elevamos cada factor primo a la potencia indicada por el número de Gödel correspondiente al signo. Así, tenemos:

$$\begin{array}{cccccccccc} \exists & x & (& x & = & x & x & + & | &) \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 2^{13} & \times 3^4 & \times 5^1 & \times 7^4 & \times 11^7 & \times 13^4 & \times 17^4 & \times 19^5 & \times 23^3 & \times 29^2 \end{array}$$

Este número de Gödel es muy grande, pero ello no debe incomodarnos, simplemente lo denominaremos como el número m .

Entonces, si cada expresión o fórmula tiene un número de Gödel, ¿cómo podemos obtener el número de Gödel correspondiente a la secuencia de expresiones que constituyen a una demostración? Simplemente, repetimos el procedimiento descrito, pero ahora se asigna un número primo ascendente a cada una de las expresiones de la demostración y, luego, se eleva cada primo a la potencia indicada por el número de Gödel de la expresión correspondiente.

Por ejemplo, considere la demostración de la proposición que afirma que «existe el número 2 como número inmediato al número 1», dado que $1 + 1 = 2$.

Esta demostración parte del axioma que afirma que siempre existe un número que es el inmediato de otro y se desarrolla al aplicar una simple regla de sustitución (reemplazar una variable por un número). En forma económica, la demostración se compone por la siguiente secuencia de expresiones:

$$\exists x_1 (x_1 = x_2 + 1)$$

$$\exists x_1 (x_1 = 1 + 1)$$

La primera fórmula es el axioma y la segunda es un teorema. La secuencia de las dos expresiones conforma a la demostración. Si empleamos nuestro alfabeto de lenguaje aritmético, estas fórmulas se pueden expresar como sigue:

$$\exists x (x = xx + |)$$

$$\exists x (x = | + |)$$

Recordemos que la primera de las fórmulas tiene un número de Gödel, que denotamos como m . También, la segunda fórmula tiene un número de Gödel que denotaremos como n . Entonces, siguiendo el procedimiento indicado, el número de Gödel para esta demostración sería:

$$k = 2^m \times 3^n,$$

que, en definitiva, es un número muy grande, pero ello tampoco debe preocuparnos porque lo denotaremos simplemente como el número k .

Aquí, lo importante es que podemos asignar un número de Gödel a los signos elementales, a las expresiones o fórmulas, y también a la secuencia de expresiones de cualquier demostración.

LA PARADOJA DE RICARDO EN SU VERSIÓN COLOQUIAL

Sea un conjunto de expresiones sobre algún número natural (proposiciones de matemática aritmética). Ahora, supongamos que estas expresiones están ordenadas de alguna forma y que a cada una se le asigna un número, a la manera de una etiqueta o índice. Dado que las expresiones se refieren a un número y debido a que cada una se encuentra identificada por un número (su etiqueta o índice), al que denotaremos en forma genérica como n , entonces se dice que el número n es ricardiano si no cumple con lo que afirma la propia expresión indexada. Por ejemplo, considere la siguiente secuencia de expresiones sobre los números naturales:

- 1.- es primo
- 2.- es par
- 3.- es impar
- ⋮

En este ejemplo, el número 1 no cumple con lo que afirma la expresión que apunta, por lo tanto, en esta lista el número 1 es ricardiano.

Ahora, supongamos que agregamos la expresión «es ricardiano» a la lista anterior y que la identificamos con el número x , entonces tendríamos una nueva lista como la siguiente:

- 1.- es primo
- 2.- es par
- 3.- es impar
- ⋮
- x .- es ricardiano
- ⋮

Ahora preguntémosnos: ¿El número x es ricardiano? Esta es precisamente la paradoja de Ricardo. Nótese que si x fuera ricardiano no cumpliría con la expresión «es ricardiano», por lo tanto concluimos que x «no es ricardiano». Esta situación aparenta ser una paradoja porque el número x es, a la vez, ricardiano y no ricardiano. Sin embargo, la paradoja se supera cuando observamos que la expresión «es ricardiano» es una proposición metamatemática que no puede ser expresada dentro del sistema deductivo propuesto (no es expresable mediante el alfabeto y las reglas de inferencia).

Entonces, el reto que realmente enfrentó Gödel en el desarrollo de su demostración, al hacer uso de la auto-referencia, fue el de poder expresarla dentro del sistema deductivo al que se refería. Encontró que esto sólo era posible en ciertos sistemas deductivos con lenguajes suficientemente poderosos. En el caso particular de la aritmética, Gödel lo logró recurriendo al sistema deductivo propuesto por Bertrand Russell en su libro *Principia Mathematica*. A partir de este sistema, Gödel introdujo una auto-referencia mediante el mapeo de las expresiones con números enteros usando la numeración de Gödel.

En todo esto, el punto clave es garantizar que existen procedimientos (algoritmos)² de terminación predecible que generan los números de Gödel y, a la inversa, para recuperar los signos, las expresiones y las demostraciones a partir de un número de Gödel dado. Los algoritmos asociados a funciones que involucran cálculos de terminación predecible se conocen técnicamente como algoritmos o funciones *recursivas primitivas*, lo que llanamente significa que tarde o temprano terminarán su tarea. Ahora, revisemos las implicaciones computacionales de todo esto.

² La razón por la que se trae a colación el concepto de algoritmo es debido a que el teorema de incompletitud para la aritmética de Gödel guarda una estrecha relación con los trabajos de Alan Turing, precursor de la ciencia de la computación, respecto del llamado *problema de decisión* (*Entscheidungsproblem*), donde demostró la imposibilidad de que exista un algoritmo general para decidir si ciertas expresiones de la aritmética son verdaderas o falsas.

EL ENFOQUE COMPUTACIONAL DE LAS PROPOSICIONES METAMATEMÁTICAS

En la pag. 75 definimos, de manera general, a un algoritmo como un procedimiento definido e inequívoco. Más precisamente, un algoritmo es un conjunto ordenado y finito de instrucciones o reglas bien definidas que, sin ambigüedad, permite al ejecutor realizar una actividad mediante pasos sucesivos. Las computadoras son máquinas que ejecutan algoritmos, codificados mediante algún lenguaje de programación, para calcular o procesar ciertas funciones. Así, un algoritmo se puede asociar a un *programa* o secuencia de instrucciones codificadas en cierto lenguaje de programación para una máquina computadora dada.

Ahora, supongamos que nos enfocamos únicamente en el conjunto de las expresiones de nuestro lenguaje aritmético que constituyen funciones aritméticas³ recursivas primitivas con un solo parámetro n . También, supondremos que podemos enumerar a todas estas funciones mediante la asignación de un número entero k , a la manera de un índice único, tal y como lo hace Gödel en su demostración.

También supongamos que contamos con un lenguaje de programación donde no es posible caer en lazos infinitos,⁴ de tal manera que siempre podemos escribir programas terminables (con un tiempo de ejecución finito). Dado que las funciones que nos atañen son recursivas primitivas, con este lenguaje de programación es perfectamente posible escribir programas que, tarde o temprano, terminan de calcular (procesar) estas funciones. Denotaremos a cada programa (asociado con un algoritmo) con la siguiente nomenclatura:

$$\textit{Programa_terminable} < \#k > (n)$$

que hace referencia al programa terminable, con número índice k , que tiene como parámetro al número n .

Por ejemplo, supongamos que tenemos la lista de todos los programas terminables asociados a las funciones aritméticas recursivas primitivas de un solo parámetro. Entonces, por decir algo, podríamos tener al programa #21 que corresponde a la función $f(n) = 2 \times n$, de tal manera que

$$\textit{Programa_terminable} < \#21 > (n) = 2 \times n$$

Ahora, definamos un nuevo programa con un solo parámetro en función de los que ya están en la lista. Por ejemplo,

$$\textit{Programa_nuevo}(n) = \textit{Programa_terminable} < \#n > (n) + 1 \quad (1)$$

Podemos observar que este programa es terminable y también tiene un solo parámetro. Por lo tanto, debería estar en la lista original, dado que dijimos que esta incluía a todos los programas terminables de un solo parámetro.

³ Que producen un número mediante cierto procedimiento o algoritmo.

⁴ En programación, un lazo infinito es una estructura de control del tipo: «Mientras $1 + 1 = 2$ haz esto ...». Claramente $1 + 1$ siempre será igual a 2, por lo tanto este programa no terminará nunca.

Veamos lo que esto implica. Supongamos que este programa sí está en la lista original y que tiene un número de índice x . En ese caso, tendríamos la siguiente igualdad

$$\text{Programa_nuevo}(n) = \text{Programa_terminable} < \#x > (n) \quad (2)$$

Sin embargo, surge un problema cuando el número que pasamos como parámetro es justamente el número del índice x . En tal caso tendríamos, partiendo de la ecuación (1),

$$\text{Programa_nuevo}(x) = \text{Programa_terminable} < \#x > (x) + 1$$

mientras que, partiendo de la ecuación (2), tendríamos

$$\text{Programa_nuevo}(x) = \text{Programa_terminable} < \#x > (x)$$

Resulta que esto es una incoherencia, ya que ningún número natural es igual a su inmediato. Sin embargo, esta paradoja se puede superar de una manera práctica si decidimos que, efectivamente, el nuevo programa no está en la lista sino que, más bien, se encuentra fuera de ella. Esto automáticamente implicaría que la lista original no puede incluir a todos los programas para funciones aritméticas recursivas primitivas de un solo parámetro.

De nuevo, hemos salvamos la inconsistencia mediante el reconocimiento de aquello que está fuera del sistema, en este caso, del reconocimiento de que el nuevo programa es, en realidad, un *metaprograma*: Un programa que hace referencia a los programas de la lista ¡desde afuera! Con esto, avanzamos un paso más hacia la idea central detrás de la demostración de Gödel para su teorema de incompletitud de la aritmética.

CÓMO EXPRESAR LA AUTO-REFERENCIA EN FORMA ARITMÉTICA

Antes de delinear un bosquejo para el teorema de incompletitud, debemos hacer un repaso de algunos puntos clave. Primero, Gödel encontró la forma de expresar proposiciones acerca de un sistema formal aritmético, mediante fórmulas aritméticas, dentro del mismo sistema formal. Luego, demostró que, dado un sistema deductivo y su alfabeto, es posible asignar un número único a cada signo, fórmula o demostración (secuencia de fórmulas). Ya sabemos que estos números son justamente los números de Gödel y que sirven como etiquetas o índices para cada signo, fórmula o demostración.

Por otro lado, así como tenemos funciones recursivas primitivas (cuyos algoritmos asociados involucran cálculos de terminación predecible), también tenemos proposiciones recursivas primitivas, que también son aquellas que involucran cálculos de finalización predecible. Gödel demostró que toda proposición recursiva primitiva de la aritmética, expresada mediante un lenguaje formal aritmético, es un teorema y viceversa. A esto se le conoce como el *lema de correspondencia*.

Además, dado que la secuencia de una demostración siempre incluye en la conclusión a la fórmula del teorema y dado que el número de Gödel de la demostración se obtiene mediante una relación aritmética (de los números de Gödel de las fórmulas que la componen), entonces podemos expresar esta relación como una fórmula, a la que denotaremos como sigue:

$$formula_demostracion_teorema(x, z)$$

que no es más que una referencia a la fórmula que indica la relación aritmética entre el número de Gödel x de la demostración y el número de Gödel z del teorema. Entonces, podemos leerla como:

«Fórmula para derivar el número de Gödel z de un teorema a partir de el número de Gödel x de su demostración.»

Dado que esta relación aritmética es recursiva primitiva, por el lema de correspondencia tenemos que existe una expresión dentro del sistema formal aritmético para la misma. Esta fórmula, debidamente expresada en el sistema formal, la referiremos con mayúsculas como sigue:

$$FORMULA_DEMOSTRACION_TEOREMA(x, y)$$

Ya insinuamos que la idea clave en la demostración de Gödel es la de sustituir en una fórmula con un solo parámetro su propio número de Gödel. El paso siguiente es, dado que la nueva fórmula también es recursiva primitiva, calcular el nuevo número de Gödel después de dicha sustitución. Para referirnos a este nuevo número de Gödel emplearemos la siguiente notación,

$$numero_G_por_sust(x, y, x)$$

que podemos leer como:

«El número de Gödel correspondiente a la expresión, cuyo número de Gödel es x , cuando sustituimos cada aparición del parámetro y por el número x .»

Dado que los cálculos para obtener este número son de terminación predecible, podemos expresar a este número dentro del sistema formal con una fórmula que denotaremos con mayúsculas como sigue:

$$NUMERO_G_POR_SUST(x, y, x)$$

Con estos elementos, ahora estamos en condiciones de bosquejar la demostración del teorema de incompletitud de Gödel para la aritmética.

UN BOSQUEJO PARA EL TEOREMA DE INCOMPLETITUD DE GÖDEL

Para demostrar que cierta clase de fórmulas aritméticas no son formalmente demostrables (lo que técnicamente se denomina como *indecidibilidad*), Gödel comenzó con la siguiente fórmula:

$$\neg \exists x \text{ FORMULA_DEMOSTRACION_TEOREMA}(x, \text{NUMERO_G_POR_SUST}(z, y, z)) \quad (3)$$

que es una proposición metamatemática que puede leerse:

«No existe un número de Gödel x tal que se pueda derivar el número de Gödel que corresponde al siguiente teorema: la expresión, cuyo número de Gödel es z , que resulta de sustituir cada aparición del parámetro y por el propio número z .»

o, en corto,

«La fórmula con el índice $\text{numero_G_por_sust}(z, y, z)$ no tiene demostración.»

La expresión (3) también es recursiva primitiva y , por lo tanto, puede expresarse dentro del sistema formal. El número de Gödel de la expresión (3) lo denotaremos con n . Si ahora sustituimos en esta expresión su número de Gödel, en cada aparición de la variable z , obtenemos la siguiente expresión:

$$\neg \exists x \text{ FORMULA_DEMOSTRACION_TEOREMA}(x, \text{NUMERO_G_POR_SUST}(n, y, n)) \quad (4)$$

que, en corto, se puede leer como:

«La fórmula con el índice $\text{numero_G_por_sust}(n, y, n)$ no tiene demostración.»

Esta nueva expresión también es recursiva primitiva y , por lo tanto, es expresable dentro del sistema formal. También tiene un número de Gödel, que denotaremos con g . Si analizamos con cuidado la expresión (4) descubriremos que, justamente,

$$g = \text{NUMERO_G_POR_SUST}(n, y, n)$$

Por lo tanto, la expresión (4) puede leerse también como:

«La fórmula con número de Gödel g no tiene demostración.»

pero, da la casualidad que, el número g es justamente el número de Gödel de esta expresión. Entonces, esta expresión puede leerse llanamente como

«Esta fórmula no tiene demostración.»

Este es justamente el camino que Gödel siguió para expresar la auto-referencia dentro del mismo sistema formal empleando, como hemos visto, únicamente fórmulas aritméticas.

Como último paso, Gödel demostró, mediante el lema de correspondencia, que si la expresión (4) tuviera demostración, también la tendría su negación $\neg(4)$. Como una de estas dos expresiones tiene que ser verdadera y la otra falsa, el hecho de que exista demostración para ambas demuestra que el sistema es inconsistente. Para resolver tal inconsistencia, una de las dos expresiones no debe tener demostración dentro del sistema.

¿Cuál de las expresiones, entre (4) y $\neg(4)$, no tiene demostración? Lo inmediato es optar por la expresión (4) que, en sí misma, afirma que no tiene demostración. Si aceptamos que (4) no tiene demostración, la proposición (4) es claramente verdadera, ya que justo eso es lo que declara. Pero, como consecuencia, ahora tenemos proposiciones verdaderas que no son demostrables. Por lo tanto, el sistema es incompleto.

Aquí, termina nuestro bosquejo de demostración.

ALGUNAS CONSIDERACIONES FINALES SOBRE LAS IMPLICACIONES DEL TEOREMA DE INCOMPLETITUD DE GÖDEL

Durante mucho tiempo, la creencia de los matemáticos fue que todas las matemáticas, por derecho propio, tenían que ser completas y consistentes. Es decir, que toda proposición matemática verdadera (en cualquiera de sus especialidades) podía derivarse a partir de los axiomas y postulados del sistema. Por otro lado, las matemáticas también tendrían que ser siempre consistentes. De otra manera, podría derivarse una proposición falsa a partir de los mismos axiomas y postulados, lo que sería catastrófico. El teorema de incompletitud de Gödel vino a demostrar que la condición para que un sistema deductivo matemático sea, a la vez, completo y consistente no siempre es posible.

La implicación filosófica más sugerente de este hecho es que no es posible enumerar todas las verdades o, en otras palabras, que siempre pueden surgir nuevas verdades a partir de las ya existentes. Por lo tanto, el concepto de verdad es completamente utópico e inalcanzable: nunca podremos conocer toda la verdad porque, aun cuando creamos que ya poseemos todas las verdades, siempre podrán surgir nuevas verdades, nos guste o no.

El teorema de incompletitud de Gödel tiene, además, repercusiones prácticas, sobre todo para las matemáticas aplicadas y específicamente en la computación. David Hilbert (1862-1943), prestigioso matemático alemán, planteó algunos problemas sobre las matemáticas en el memorable Congreso Internacional de Matemáticos de 1900, en París. Tres de estos problemas son los que nos interesan ahora:

1. Problema de completitud: ¿Las matemáticas son completas?
2. Problema de consistencia: ¿Las matemáticas son consistentes?
3. Problema de decisión: ¿Podemos discernir en un tiempo predecible si una proposición matemática es falsa o verdadera?

Hoy sabemos que los resultados de Kurt Gödel permiten contestar negativamente a las dos primeras preguntas. También sabemos que los trabajos del matemático inglés Alan Turing (1912-1954) permiten contestar negativamente a la tercera, ya que demostró que no es posible determinar si un programa es terminable o no y, con ello, es imposible desarrollar un algoritmo de terminación predecible para discernir si una proposición es falsa o verdadera.

No obstante lo antes expuesto, y para colocar las cosas en su justa dimensión, en este punto conviene aclarar que los resultados de Gödel y de Turing se obtuvieron a partir de contraejemplos (excepciones) ingeniosos, y que estos no contradicen el hecho de que existe una gran clase de sistemas formales de utilidad que son completos y consistentes, de la misma forma que existen muchos programas útiles que sí terminan.

Sin embargo, y esto es lo importante, estas excepciones tienen implicaciones gigantescas porque, así como los descubrimientos en la física a inicios del siglo XX, particularmente en la mecánica cuántica, echaron por tierra la creencia en un universo perfectamente ordenado y predecible, los resultados de Kurt Gödel y Alan Turing vinieron a acabar con la creencia en el poder sin límites de las matemáticas y la computación. Con todo ello, la escuela filosófica del positivismo se vio obligada a empezar a ceder posiciones ante los hechos contundentes de una realidad compleja.

Finalmente, queda una pregunta abierta. Si los sistemas formales no modelan con amplitud los procesos matemáticos, entonces, ¿qué modelos sí lo hacen? Descartando, por supuesto, el caso trivial de que cada proceso se modela a sí mismo.

BIBLIOGRAFÍA

- Hofstadter, Douglas. 2013. *Gödel, Escher, Bach: Un eterno y grácil bucle*. Tusquets Editores - Conacyt.
- Mitchell, Melanie. 2011. *Complexity: A Guided Tour*. Oxford University Press.
- Nagel, E. and J. R. Newman. 2001. *Gödel's Proof*. New York University Press.
- Penrose, Roger. 2009. *La nueva mente del emperador*. De Bolsillo.
- Uspensky, V. A. 1987. *Gödel's Incompleteness Theorem*. Mir Publishers.

TEJIENDO REDES: DESDE LAS CÉLULAS HASTA LOS ECOSISTEMAS

Valeria Hernández-Hernández[‡]
Cecilia González-González[§]

Si nuestros cerebros fueran suficientemente simples como para comprenderlos, seríamos tan simples que no podríamos hacerlo.

Ian Stewart, *The Collapse of Chaos*.

* * *

CONSIDERANDO el sinnúmero de interacciones involucradas, así como los procesos que afectan las diversas escalas de organización de los sistemas vivos y sus diferentes dinámicas, una pregunta fundamental para la ciencia es la siguiente: ¿Es posible abordar el estudio de los sistemas vivos? Los modelos matemáticos y computacionales pueden ser de gran utilidad para el estudio de los sistemas complejos. En este capítulo presentaremos a las redes complejas como una de estas herramientas.

LAS NUBES QUE MURMURAN

Al desvanecerse la luz del día se observa una nube negra que se mueve en el cielo. Se trata de una parvada de estorninos (*Sturnus vulgaris*), una especie de aves paseriformes originarias de Europa y Asia occidental, que emprenden el vuelo formando una masa compacta de miles de aves que se mueven de manera conjunta, creando una unidad. No hay un líder que dicte los movimientos, cada individuo trata de volar lo más cerca posible de sus vecinos, *copiando* instantáneamente cualquier cambio en velocidad o dirección. La nube se dispersa hacia un lado, se contrae, se vuelve a dispersar, de un extremo surge una extensión con forma de espiral que después es reabsorbida por la masa. La armonía de estos movimientos crea una coreografía aérea que deleita la mirada y crea la impresión de que uno está observando a un solo organismo. Le llaman “el murmullo”, debido al sonido que produce el movimiento de las alas.

[‡] Instituto de Ecología y Centro de Ciencias de la Complejidad, Universidad Nacional Autónoma de México. / valeriahhdez@gmail.com

[§] Instituto de Ecología y Centro de Ciencias de la Complejidad, Universidad Nacional Autónoma de México. / ceci-g.g@ciencias.unam.mx

Este fenómeno no sólo asombra desde una perspectiva estética, sino también desde un enfoque científico. Si pensamos en la escala de una o un par de aves, la maravilla puede perderse: cuando un ave se mueve, también se mueve el ave vecina. Sin embargo, lo sorprendente se evidencia cuando observamos que el patrón de vuelo de miles de aves cambia constantemente sin que se pierda la unidad, ¿cómo emergen los patrones de movimiento a partir de las unidades individuales, creando lo que ha llegado a llamarse un “superorganismo”? Es ahí cuando nos damos cuenta de que no podemos entender este fenómeno a partir de la descripción –incluso la descripción muy detallada– de sus partes individuales, sino que estos patrones de movimiento emergen de las interacciones entre sus componentes y solamente tiene sentido estudiarlos en la escala colectiva. Las propiedades y dinámica del colectivo no pueden entenderse únicamente como la suma de las propiedades de los elementos individuales, a lo que se le conoce como no aditividad o no linealidad.

La no linealidad es una propiedad de los sistemas complejos. En este caso, *complejo* no es utilizado como sinónimo de *complicado*, sino que se refiere a conjuntos de elementos cuyas relaciones dan lugar a comportamientos colectivos *emergentes* no definidos para los elementos aislados, así como a la capacidad de procesar información y adaptarse (ver Mitchell, 2011). Existen diferentes tipos de sistemas complejos: químicos, como los que se dan con la mezcla de ciertas sustancias que generan espirales u otras formas no triviales; físicos, como las interacciones de los gases en la atmósfera; computacionales, como las redes sociales electrónicas; y biológicos, como todos los seres vivos y las comunidades que formamos entre nosotros.

LA ESCALERA A LA COMPLEJIDAD

La complejidad y belleza de la naturaleza a veces no son tan evidentes como en el caso del murmullo, una sola célula puede entrañar secretos asombrosos.

Los organismos que estamos compuestos de diferentes tipos de células frecuentemente comenzamos el proceso de desarrollo a partir de una sola célula: el cigoto. Una de las preguntas más desafiantes en la biología contemporánea tiene que ver con el estudio de los procesos que llevan al microscópico cigoto a desarrollarse en un organismo macrosrocópico con diferentes tipos de células arregladas en patrones espaciales estereotípicos, con distintos órganos y tejidos y que presenta una intrincada conducta y fisiología.

Esta pregunta se ha intentado abordar desde diferentes perspectivas, las que se complementan entre sí. Sin embargo, por mucho tiempo se ha puesto mayor énfasis en el estudio de la función de los genes en el desarrollo que en el papel de otros factores. Si bien este enfoque nos ha dado explicaciones útiles, en el desarrollo biológico intervienen otras variables y dinámicas, además de la de los genes. Su complejidad demanda, entonces, que estudiemos el efecto que tienen estos otros tipos de dinámicas en el desarrollo y cómo estas se afectan entre sí. Entre estos otros factores están los ecológicos, físicos y químicos, los cuales afectan y pueden

ser afectados por el desarrollo de los seres vivos.

No podemos negar que los seres vivos, además de sistemas biológicos, somos también sistemas físicos y, como tales, estamos sujetos a procesos físicos. Por ejemplo, en la formación de manchas o patrones estereotípicos en la piel de animales, como los reptiles y mamíferos, parecen intervenir procesos físicos tales como la deformación mecánica de los tejidos y la adhesión diferencial entre las células de diferentes tipos. Durante la formación de estos patrones de pigmentación, los cromatóforos (células pigmentadas) migran a través del mesénquima, un tejido que, físicamente, se comporta como una matriz o sustrato deformable. La migración de los cromatóforos a través del mesénquima lo deforma y genera líneas de tensión.

Se ha propuesto que estas deformaciones sirven como canales o como una especie de *carretera* (ya que facilitan que los cromatóforos se agreguen entre sí en zonas específicas) para la migración de los cromatóforos. Además de la deformación generada por las fuerzas de tensión mecánica, la adhesión entre los cromatóforos y entre éstos, con respecto al mesénquima, es tal que resulta en una mayor agregación de los cromatóforos entre sí, formando manchas y bandas como las que suelen verse en las pieles de algunos animales. Existe un modelo que tiene su base solamente en estas interacciones físicas y en la geometría del cuerpo y que es capaz de reproducir y predecir la formación de patrones de manchas de reptiles como las serpientes (ver Caballero *et al.*, 2012).

Sin embargo, la historia de cómo las fuerzas mecánicas intervienen en el desarrollo no concluye ahí. En años recientes se ha acumulado evidencia experimental, tanto en plantas como en animales, que indica que las fuerzas de tensión y de compresión pueden afectar la transcripción de genes en el núcleo de las células, por ejemplo, a través de cambios en la concentración intracelular de iones Ca^{+2} . En la membrana de las células se encuentran embebidos canales iónicos que cambian su forma en respuesta a las fuerzas de compresión y de tensión que actúan sobre ellos. Estos cambios de forma pueden desencadenar la entrada de iones de calcio que activan a proteínas que, a su vez, estimulan la transcripción de genes relacionados con la división de las células.

Cabe recalcar que las características mecánicas (elasticidad, rigidez, etc.) de los tejidos como el mesénquima, son producto de diversos procesos celulares con un correlato genético, por lo que esto coloca a las células no como lectoras o receptoras de las fuerzas mecánicas, sino también como productoras de éstas. Dicho de otra manera, hay una relación no lineal entre las fuerzas mecánicas del desarrollo y la actividad de los genes (ver figura 1). Hemos subido un escalón más en la complejidad de los sistemas biológicos.

«ENREDANDO» A LA COMPLEJIDAD

Ahora podemos retomar nuestra pregunta inicial. Con tantas interacciones no lineales, procesos afectando diversas escalas de organización de los sistemas vivos y dinámicas diferentes, ¿cómo podemos abordar el estudio de los complejos sistemas vivos? Aunque existen muchos tipos de modelos (matemáticos y computacionales)

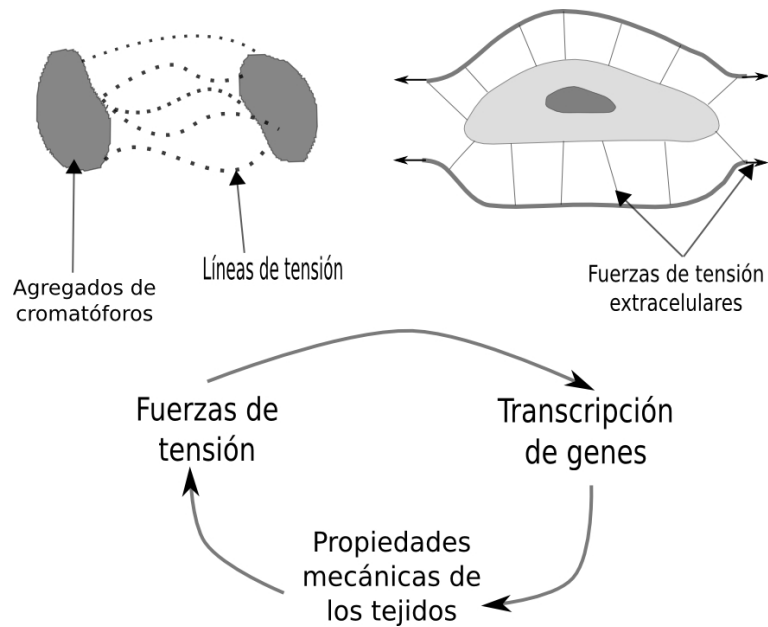


Figura 1: Representación esquemática de las relaciones no lineales entre las fuerzas mecánicas y los procesos moleculares del desarrollo. Durante la migración de los cromátóforos, el mesénquima sufre deformaciones mecánicas que modifican las fuerzas de tensión que las células experimentan. En respuesta, las células modifican la transcripción de ciertos genes lo que, a su vez, es capaz de alterar las propiedades mecánicas del tejido.

de gran utilidad para el estudio de los sistemas complejos, su aplicación depende de los objetivos que plantee la investigación. En lo que resta de este capítulo, comentaremos algunas aplicaciones de una de estas herramientas: las redes complejas.

Las redes son modelos de conjuntos de elementos que interactúan entre sí. A los elementos se les conoce como nodos o vértices. Un nodo puede representar cualquier cosa de la naturaleza: una persona, una molécula, una especie, una fuerza física, etc. y las líneas que los conectan están dadas por relaciones entre estos elementos. Por ejemplo, en una red social los nodos representan personas y las interacciones entre éstos pueden estar dadas por relaciones de parentesco o de amistad, o incluso ambas, con lo que obtenemos redes con diferentes estructuras, a pesar de tener los mismos nodos.

Las redes pueden ser principalmente de dos tipos: dirigidas y no dirigidas (ver figura 2). Para construir una red no dirigida basta con saber si dos nodos están conectados o no. Al contrario, las redes dirigidas no sólo requieren saber qué nodos están conectados sino también cómo lo hacen. El nodo *B* puede estar conectado con el nodo *A* (lo inhibe o apaga) pero no viceversa (ver figura 2b). Por ejemplo, una red metabólica dirigida nos diría con qué sustratos está conectada la enzima

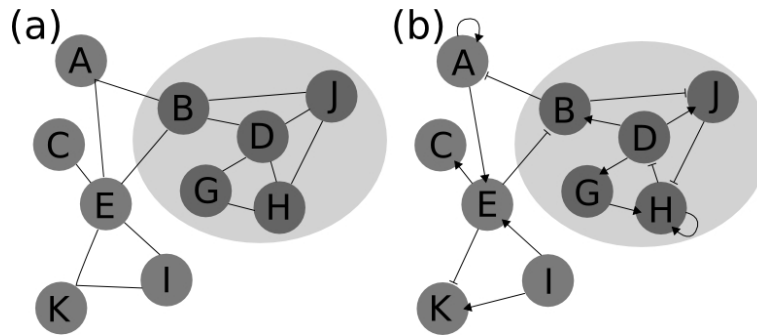


Figura 2: Representación esquemática de una red dirigida (a) y una no dirigida (b). Encerrados en un círculo gris se representan módulos, los cuales se consideran como un conjunto de nodos que están más interconectados entre sí que con el resto de la red.

A y cómo interactúa con ellos: ¿los degrada?, ¿los activa? (ver figura 2b).

El estudio de las redes complejas puede dividirse en dos campos: estructura y dinámica. El interés principal del primer campo es describir las propiedades de la arquitectura de las redes, es decir, cómo están conectados los nodos entre sí. Por ejemplo, podemos medir la distribución de conexiones, que se refiere a la probabilidad de que un nodo escogido al azar tenga k conexiones. El coeficiente de agregación (o coeficiente de agrupamiento, del inglés *clustering*) mide la probabilidad de que dos nodos A y B , que están conectados a un tercer nodo C , estén conectados entre sí; este coeficiente nos da una idea de la modularidad de la red.

En términos estructurales, se consideran como módulos a los grupos de nodos que están más conectados entre sí que con el resto de la red (ver figura 2). Por ejemplo, si pensamos en una red de amistades de una ciudad, veremos que se forman grupos de personas que tienen más conexiones entre ellas que con el resto de la red, lo que podría reflejar los grupos de amigos que se forman en el trabajo, en la escuela, etc.¹

Las interacciones entre los nodos de una red y los atributos estructurales de ésta pueden subyacer tras fenómenos interesantes. Por ejemplo, podemos estudiar cómo se dispersa un virus en una comunidad, o bien cuáles son los elementos clave para la integridad de la misma.

Por otra parte, el estudio de la dinámica de la red puede ayudarnos a explorar cómo cambia el estado de los nodos (por ejemplo, de enfermo a sano) a lo largo del tiempo y llevarnos a descubrir comportamientos emergentes, como los que describimos anteriormente sobre el murmullo de los estorninos.

Un tipo de modelos con los que se puede estudiar la dinámica de las redes son los modelos booleanos. En las redes booleanas tenemos una cantidad n de nodos que interactúan con otros nodos de la red. A cada nodo se le asigna una función

¹ Si está interesado en aprender más sobre el estudio de la estructura de las redes, le recomendamos el libro de Mark Newman al que hacemos referencia en la bibliografía.

booleana del tipo:

$$x_i(t + \tau) = f_i(x_1(t), x_2(t), \dots, x_k(t))$$

que describe qué nodos lo están afectando y de qué manera. Cada nodo está definido por una variable cuyo estado activado (1) o inhibido (0) está determinado por su función booleana correspondiente. La dinámica del sistema corresponde a una serie de estados de las variables, en la que el estado de la red en el tiempo $t + 1$ se determina mediante la evaluación de las funciones booleanas de todos los nodos de la red en el tiempo t .

El estado de la red en cierto tiempo está dado por el conjunto de 0 y 1 de todos los nodos componentes. De esta manera, la cantidad de posibles estados de la red está dada por 2^n , donde n es el número de nodos que componen la red. Dado que el espacio de posibles estados de la red es finito, en última instancia, la red puede alcanzar una combinación de 0 y 1 que regresa a sí misma, aun después de aplicar las reglas booleanas. A estos estados autosostenidos del sistema se les conoce como *atractores*.

BAJO LA LUPA DE LA REDES...
SE PUEDEN ESTUDIAR A LOS SISTEMAS MOLECULARES

Como se mencionó antes, una de las interrogantes en la biología del desarrollo es la de cómo se establecen los distintos tipos de células de un organismo (neuronas, células renales, células de la piel, etc.) y cómo éstas se organizan en patrones espaciales estereotípicos. Ciertamente, estos distintos tipos de células exhiben diferentes combinaciones de genes activos, pero pensar en que las diferencias entre tipos celulares pueda deberse a diferencias genéticas entre ellas es insuficiente, pues la mayoría de las células que conforman un organismo tienen el mismo genoma.

A finales de los años sesenta del siglo XX, Stuart Kauffman propuso que para estudiar la determinación de los distintos tipos de células era necesario no sólo estudiar las secuencias de sus genes, sino también las interacciones entre éstos. Efectivamente, muchos de los genes que se hallan al interior de cada célula pueden codificar proteínas que a su vez facilitan o inhiben la expresión de otros genes. Estas relaciones de regulación positiva y negativa entre genes puede traducirse en redes de regulación genética (RRG) y Kauffman propuso que, para estas redes, los atractores a los que se llega corresponden a los estados característicos de activación génica que distinguen a los distintos tipos de células en un organismo (ver fig. 3).

A pesar de que este tipo de modelos cualitativos son simplificaciones de la realidad genética (en la que los genes no son interruptores binarios) existen varios estudios de RRG que demuestran que los atractores de las simulaciones sí corresponden a las configuraciones genéticas estables observadas en los diferentes tipos celulares (por ejemplo, ver Benítez *et al.*, 2013). Los modelos booleanos son quizá los más sencillos para estudiar dinámicas de interacción, sin embargo, esta sencillez no disminuye su utilidad: los modelos booleanos pueden integrar información experimental de diferentes tipos; es relativamente fácil validar sus predicciones (ya

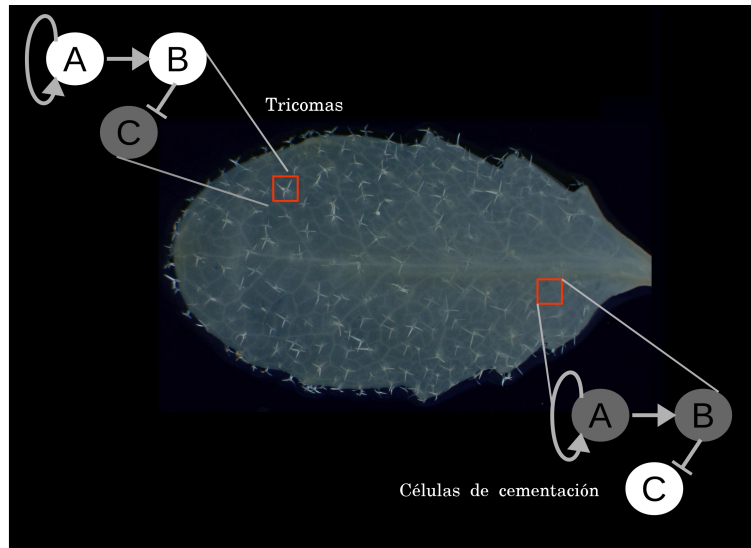


Figura 3: En la dinámica de la red de regulación genética (RRG) de los tipos celulares de la epidermis de *Arabidopsis thaliana*, las interacciones entre los nodos (genes) llevan a configuraciones de activación (círculo blanco) y de inhibición (círculo gris) que se sostienen en el tiempo (atractores). Estos atractores, y no una composición diferente de genes, es la que da lugar a los tricomas y a las células de cementación.

que se enfocan en los estados estables del sistema); y, cuando carecemos de suficiente información sobre el sistema de estudio, son una primera aproximación viable. Incluso, estos modelos nos pueden ayudar a proponer interacciones aún no conocidas entre elementos, con la posibilidad de ser verificadas posteriormente en el sistema real.

Esta propuesta de estudio y modelado de los procesos de determinación de los tipos celulares ha guiado mucha de la investigación reciente en biología del desarrollo y han sido validados experimentalmente en distintos casos. Uno de éstos es el de la determinación de los tipos celulares en la epidermis (la capa celular más superficial) de las hojas de una planta de la familia de las mostazas llamada *Arabidopsis thaliana*. En este sistema se tienen únicamente dos tipos celulares de interés, los pelos o tricomas y las células que no forman tricomas, conocidas como células de cementación (ver figura 3).

Aunque no pareciera muy interesante, este sistema ha sido ampliamente estudiado por diversos laboratorios, en la escala genética, puesto que provee de un sistema relativamente sencillo para estudiar los procesos de diferenciación celular. No obstante los numerosos trabajos en torno a los genes involucrados en la determinación de estos dos tipos de células, mucha de esta información permanecía desarticulada y no era posible comprender cómo la dinámica colectiva de los genes, y demás moléculas involucradas en este proceso, daba lugar a patrones

característicos de tricomas separados entre sí por células de cementación.

Fue en este contexto que se desarrollaron diversos modelos de RRG y, en particular, un modelo de red booleana² que permitió integrar la información disponible y brindar una explicación de los mecanismos detrás de la emergencia del patrón mencionado. Más aún, estos modelos matemáticos dieron lugar a hipótesis novedosas que han retroalimentado a los trabajos experimentales y han contribuido a la mejor comprensión de éste y otros sistemas modelo en la biología del desarrollo.

A pesar del uso fructífero de los modelos de redes en este sistema de estudio, es importante mencionar que dichos modelos aún no consideran factores clave en la variación del número y arreglo espacial de los tricomas en respuesta a distintos estímulos ambientales. Entonces, sigue pendiente el reto de ir más allá del estudio de la dinámica colectiva de los genes y elaborar modelos que consideren las relaciones recíprocas entre procesos en la escala del organismo, los genes y el medio ambiente.

... Y LOS SISTEMAS ECOLÓGICOS TAMBIÉN

Daremos un salto triple mortal, pasando de los microscópicos procesos celulares del desarrollo biológico a las macroscópicas interacciones entre las especies biológicas que conforman a los ecosistemas.

En un ecosistema unas especies se comen a otras (depredación), compiten entre sí (competencia) o se benefician entre ellas (mutualismo). Podemos pensar como redes al conjunto de los diversos tipos de interacciones ecológicas, en donde las especies son representadas como nodos.

A pesar de que el estudio de cómo las especies interactúan entre sí tiene una larga tradición, los estudios ecológicos se han enfocado, en su mayoría, a estudiar pares de especies o redes que involucran solo un tipo de interacción. Por ejemplo, existen redes mutualistas entre las plantas con flores y sus polinizadores pero no consideran las relaciones de competencia entre las mismas plantas con flor. De estos estudios, se ha concluido que las redes mutualistas tienden a presentar una estructura anidada mientras que, en comparación, las redes de competencia o depredación son más modulares (ver figura 4). Esto quiere decir que las redes mutualistas tienden a tener más especies generalistas que especialistas.

En nuestro ejemplo de plantas y polinizadores, la mayoría de las especies de plantas se relacionarían con una gran cantidad de polinizadores mientras que otras sólo con algunos y así, con cada vez menos, hasta llegar a unas pocas plantas que sólo se relacionan con una sola especie de polinizador. La palabra *anidamiento* se refiere a que el conjunto de polinizadores que interactúan con una planta son, a su vez, un subconjunto de los que interactúan con otra. Por otro lado, las redes de competencia o depredación se estructuran más bien en grupos que no comparten demasiados nodos entre sí, como el ejemplo que dimos anteriormente de las redes sociales.

² Véase una revisión sobre los diversos modelos propuestos en Benítez *et al.*, 2013.

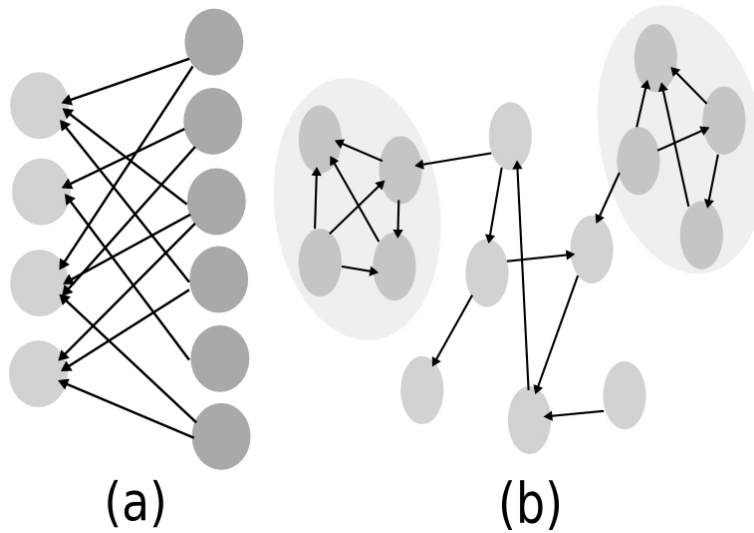


Figura 4: Representación esquemática de una red ecológica anidada (a) y una modular (b).

Aún no comprendemos cabalmente las causas detrás de estas diferencias estructurales, pero la caracterización de estas diferencias plantea preguntas sumamente interesantes en torno a cuáles son los procesos ecológicos y evolutivos subyacentes al ensamblaje de cada uno de estos tipos de redes.

Más allá de las interacciones pareadas o de un solo tipo, es el conjunto de todas las interacciones entre especies que componen un ecosistema lo que subyace a su integridad y funcionamiento, como por ejemplo, el reciclaje autosostenido de nutrientes tales como el carbono y el nitrógeno, o la capacidad de resistir la llegada de especies exóticas sin que se vuelvan invasoras. ¿Cómo es que los diferentes tipos de interacciones ecológicas determinan estas características ecosistémicas? Esta es una pregunta clave y su respuesta es crucial para entender el conjunto de los procesos que moldean a los ecosistemas en el tiempo y el espacio, y la forma en que éstos pueden ser afectados por eventos tales como el cambio climático o la fragmentación del hábitat.

En relación a la conservación de la biodiversidad, con frecuencia se dice que el problema de la extinción de especies tiene como causa única o primordial la sobrepoblación de seres humanos en el planeta. Entre más gente haya en el mundo, habrá más superficie de tierra para cultivos (y, por lo tanto, mayor pérdida de hábitat natural). De acuerdo con esta visión, existe una incompatibilidad entre la conservación de la biodiversidad y los cultivos para alimento humano. Sin embargo, en el libro *La matriz de la naturaleza* (*Nature's Matrix*, en inglés), los ecólogos Ivette Perfecto, John Vandermeer y Angus Wright, plantean que esto no es necesariamente cierto.

El argumento de los autores se fundamenta en tres razones. La primera es que

raras veces los ecosistemas son puramente naturales o exclusivamente de uso agropecuario, sino que hay gradientes entre estos dos extremos y que el paisaje es, más bien, una matriz de parches³ de vegetación natural mezclados con parches de tierra con mayor o menor grado de manejo por el ser humano.

La segunda razón tiene que ver con la teoría de metapoblaciones de la ecología. Una metapoblación se considera como un conjunto de poblaciones pequeñas de la misma especie que están separadas espacialmente, pero entre ellas hay migración de individuos, razón por la que también se le conoce como una “población de poblaciones”. Dentro de las poblaciones individuales, aun a pesar de que el ser humano no las afecte, las extinciones locales de las especies son inevitables y ocurren de manera natural. Sin embargo, en una metapoblación, las poblaciones individuales tienen un suministro continuo de individuos que se desplazan entre ellas. Mientras la tasa de migración balancee a la de extinción, las poblaciones sobrevivirán y, por lo tanto, la especie.

Si la migración entre parches es inhibida o seriamente comprometida, todas las poblaciones individuales desaparecerán y, eventualmente, la especie se extinguirá. Ahora, ¿de qué depende que los individuos sean o no capaces de migrar entre los distintos parches de hábitat natural? Lo primordial es que éstos no mueran en el camino. Y ¿de qué depende que mueran o no en el camino? Pues de lo que se encuentren en este. Por ello es que se habla de la *calidad* de la matriz, haciendo referencia a las condiciones del terreno, favorables o desfavorables, que los individuos han de atravesar para alcanzar otros sitios apropiados para su establecimiento.

Para ejemplificar esto, imaginemos que tenemos un paisaje que alberga una metapoblación de armadillos. En cada población individual, el número de individuos aumenta y disminuye con el tiempo, llegando a extinguirse en algunos sitios, pero recuperándose gracias al flujo continuo de algunos individuos a través de todo el paisaje. Ahora, pensemos en un armadillo migrante que salió de su territorio debido a la fuerte competencia por alimento que mantenía con los demás armadillos en su lugar de origen. Para llegar a otro sitio adecuado para su subsistencia, este animal deberá cruzar una serie de terrenos agrícolas. Para su fortuna, estos terrenos son utilizados por una comunidad humana que siembra milpa, un policultivo donde crece maíz, frijol, calabaza, una gran diversidad de quelites, agaves y unos cuantos árboles que dan sombra a los cansados campesinos. El armadillo encontrará fácilmente muchísimos insectos de los que puede alimentarse, además de sitios seguros para cavar sus guaridas mientras completa su travesía. Esto es porque la milpa, al igual que otros sistemas tradicionales de cultivo, aloja muchísima biodiversidad y facilita el establecimiento temporal o permanente de una gran cantidad de plantas y animales nativos. Esta, sin duda, es una historia feliz para el armadillo.

Sin embargo, ahora imaginemos que al salir de su hábitat no se hubiera encontrado con un sistema de milpas, sino con un gran sembradío industrializado

³ Usamos la palabra *parche* como traducción del concepto *patch*, en inglés. Aunque *patch* también se puede traducir como *parcela*, el concepto parche además lo podemos usar para hacer referencia a los manchones de vegetación nativa.

de soya. En estos “desiertos verdes”, se siembran cientos o miles de hectáreas de una sola especie, dígase la soya, que si es transgénica es resistente a los herbicidas que se utilizan a gran escala para evitar el establecimiento de cualquier otra planta. También, se emplean grandes cantidades de plaguicidas y fertilizantes para compensar los procesos ecológicos y biogeoquímicos que, dada la pérdida de biodiversidad, han sido fracturados con este tipo de manejo. Aquí, el ahora desafortunado armadillo no encuentra insecto alguno del cual alimentarse además de que los agroquímicos tóxicos en el terreno representan un peligro para su salud. En este escenario, es difícil imaginarse cómo algún individuo lograría sobrevivir a su trayecto para llegar a otra zona de hábitat natural. Aquí, cuando las poblaciones individuales se extinguen, ningún flujo migratorio las reabastece y a la larga la especie se extingue en todo el paisaje.

Finalmente, para los autores del libro *La matriz de la naturaleza*, la tercera razón para afirmar que no necesariamente es cierto que son incompatibles la conservación de la biodiversidad y los cultivos para alimento humano, es la observación de que en el pensamiento dicotómico: hábitat natural = conservación / áreas cultivadas = pérdida de especies, ignorando el hecho de que dentro de los cultivos (también llamados agroecosistemas) también existe una agrobiodiversidad que no está aislada y que interactúa con el resto de los parches de vegetación, sean estos naturales o modificados. Los citados autores articulan la teoría de metapoblaciones, considerando tanto la matriz de parches de vegetación natural como la modificada, y concluyen que no es la existencia de agroecosistemas en sí misma lo que determina la conservación de la biodiversidad, sino el tipo de prácticas llevadas a cabo dentro de éstos. Si podemos mantener una cierta calidad de los parches para que las especies puedan migrar entre ellos, entonces fomentaremos la conservación de la biodiversidad a pesar de que éstos incluyan agroecosistemas. Esto requiere un cambio de mentalidad en cuanto a los procesos de producción de alimentos.

Los modelos de redes han sido utilizados para analizar la conectividad del hábitat, representando a los nodos como los parches de vegetación, tanto natural como agroecológica, que interactúan entre sí mediante la migración de individuos, conformando una metapoblación. En estos modelos se ha podido estudiar la contribución que los parches de agroecosistemas tienen en la migración de las especies de un hábitat natural a otro. Algunos de estos modelos sugieren que los agroecosistemas pueden reducir el aislamiento de los hábitats naturales en grandes reservas y contribuir a la persistencia y conservación de las especies a través de grandes escalas espaciales y temporales.

Los modelos de redes pueden utilizar métricas como lo son la conectividad de los parches, las probabilidades de dispersión, el número de inmigrantes necesarios para que una población se establezca en un parche, los umbrales de distancia a recorrer, entre otros parámetros. De acuerdo con estos modelos, la contribución de los parches intermedios (o trampolines) reduce la distancia entre los hábitats naturales. Sin embargo, en un modelo reciente se incluyeron nuevas variables de rasgos de historias de vida, por ejemplo, la capacidad limitada de movimiento (ver Saura *et al.*, 2014).

Los experimentos *in silico* muestran que la migración de un hábitat fuente a uno destino, a través de los trampolines, puede compensar una modesta habilidad de movimiento por una alta capacidad de competencia. Si una especie tiene poca capacidad de movimiento, el éxito de su reproducción se verá mermado con la disminución de áreas por las que puede migrar. Los trampolines pueden representar zonas donde los individuos se establecen por periodos cortos de tiempo hasta llegar a su destino final. Para este tipo de especies, una red que incluya trampolines, por los que puede migrar, es crucial. La intensificación de las prácticas de cultivo compromete la disponibilidad de estos espacios para los procesos de migración de las metapoblaciones y, por lo tanto, para la conservación de la biodiversidad.

CONCLUSIÓN

El mundo que nos rodea es complejo, como lo es también cada célula que nos compone. Ante lo que podría ser una apabullante diversidad de casos, el hecho de pensar de manera sistémica, considerando aquellos rasgos dinámicos y estructurales que describen los fenómenos de manera *cualitativa*, es una herramienta intelectual muy valiosa.

Entre las distintas aproximaciones de este tipo, los modelos de redes se caracterizan por ser fácilmente aplicables a distintos contextos. El desarrollo actual de la teoría de redes permite aplicar a estos sistemas toda una serie de análisis matemáticos y computacionales que ayudan a encontrar patrones, tendencias, umbrales y estados autosostenidos. Así, se puede investigar el comportamiento general de cualquier colectivo, sin reducirlo a la mera suma de sus partes.

En el estudio de los organismos, así como en el de los sistemas ecológicos y socioambientales, este tipo de aproximaciones cobra una relevancia especial cuando se trata de evaluar los riesgos asociados a manejos y tecnologías desarrolladas con base en la visión reduccionista prevaleciente. El enfoque genocentrista, cuando se habla de transgénicos; el enfoque malthusiano, cuando se habla de hambre en el mundo; y el enfoque librecambista, cuando se habla de economía, todos ellos, son ejemplos de aproximaciones que fraccionan la realidad, poniendo énfasis en sólo algunos de sus componentes e ignorando su relación con el resto. El marco teórico de los sistemas complejos ofrece una alternativa para repensar todos estos aspectos de un manera incluyente y mucho más responsable.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo financiero tanto de PAPIIT-UNAM (IA-200714; IN-113013), como de CONACYT (221341) y UC-Mexus (CN 13-636), así como la beca CONACYT de maestría otorgada a V. Hernández-Hernández. También, agradecemos a César Iván Ojeda Linares y a Andrea Domínguez Román por proporcionar amablemente las fotografías de la hoja de *Arabidopsis*.

BIBLIOGRAFÍA

- Benítez, Mariana. 2013. "An interdisciplinary view on dynamic models for plant genetics and morphogenesis: scope, examples and emerging research avenues". *Frontiers in Plant Science*, (31):4–7.
- Caballero, L, M. Benítez, E. R. Alvarez, S. Hernández, A. V. Arzola and G. Cocho. 2012. "An epigenetic model for pigment patterning based on mechanical and cellular interactions". *Journal of Experimental Zoology Part B: Molecular and Developmental Evolution*, 3(38):209–223.
- Mitchell, Melanie. 2011. *Complexity: A Guided Tour*. Oxford University Press.
- Newman, Mark. 2010. *Networks. An introduction*. OUP Oxford.
- Perfecto, I, J. Vandermeer and A. Wright. 2009. *Nature's Matrix*. Earthscan.
- Saura, S., O. Bodin and M. J. Fortin. 2014. "Stepping stones are crucial for species' long-distance dispersal and range expansion through habitat networks". *Journal of Applied Ecology*, (51):171–182.

⊙ *Esta es una página en blanco.* ⊙

LUCIÉRNAGAS E INTERNET: LA MAGIA DE LAS REDES COMPLEJAS

Ricardo Marcelín-Jiménez*

Inclinado en las tardes tiro mis tristes redes a tus ojos oceánicos.

Pablo Neruda, *Poema VII*.

* * *

EN este capítulo presentaremos el fenómeno de los mundos pequeños y las redes de tipo Watts-Strogatz que le dan sustento. Luego, explicaremos el modelo de formación de redes libres de escala tipo Barabási-Albert. Veremos que la estructura de las redes es el soporte de las funciones que exhiben. Revisaremos algunas de sus propiedades estructurales y sus implicaciones funcionales. Por último, nos centraremos en la topología (forma) de la red Internet y comprobaremos que obedece a estos modelos, lo que nos conducirá a interesantes reflexiones sobre las implicaciones prácticas de todo ello.

UN PRELUDIO LUMINOSO DEL AMOR

La sorpresa y el asombro pueden encontrarse en los lugares menos esperados, si tenemos el cuidado para buscarlos. También pueden suscitarse ante la posibilidad de encontrar conexiones entre hechos aparentemente ajenos.

En las cálidas noches del verano tailandés, las zonas de los manglares se convierten en el escenario donde se desarrolla uno de los más sorprendentes rituales de apareamiento. Existe, por esos rumbos, una especie de luciérnaga cuyo nombre científico es *Pteroptyx malacca*. Por las noches, los machos de la especie desarrollan un ritual gracias al cual son capaces de sincronizar el encendido y apagado de sus señales luminosas, como preludio del amor.

La sincronización, por ejemplo, es uno de los fenómenos más interesantes y, diríamos, mágicos, que la naturaleza nos puede regalar. Ocurre cuando un conjunto de osciladores ajustan su frecuencia y fase para producir *copias* de una misma señal periódica. Se sabe, por sus escritos, que el físico holandés Christiaan Huygens observó cómo dos péndulos de la misma longitud lograron sincronizarse sólo por el hecho de colgar de la misma barra.

* Departamento de Ingeniería Eléctrica, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. / calu@xanum.uam.mx

El ritmo circadiano es una señal en el tiempo, periódica, que se encarga de encender y apagar diferentes subsistemas de nuestro cuerpo, según la hora del día. Entre otras muchas funciones que regula, es el responsable de que pasemos por estados de alerta y de sueño. El reloj maestro de nuestro cuerpo, que gobierna el desarrollo de este ciclo, se encuentra en un pequeño racimo de células en el centro del hipotálamo, llamado núcleo supraquiasmático. Las células que lo componen, como las luciérnagas enamoradas, consiguen, a través de una prodigiosa coreografía, encenderse y apagarse como si fueran una sola entidad, de la que surge un tono que marca el paso de nuestra vida.

Estamos, además, ante un reloj tolerante a fallas, fruto de millones de años de evolución. Decimos que es tolerante a fallas porque, para generar su tono, no depende del pulso de una sola neurona. En su lugar, forman un conjunto redundante de componentes que marchan juntas pero que, llegado el caso, podrían hacerlo aun si algunas de ellas llegaran a fallar.

Se considera que si lográramos desentrañar el misterio de las luciérnagas enamoradas, estaríamos en el camino para entender los diferentes mecanismos de tiempo que funcionan en el cuerpo humano, como el marcapasos natural del corazón o los mecanismos que regulan la dosificación de insulina en el páncreas.

EL PARIENTE DE UN AMIGO MUY CERCANO. . .

Hacia finales del siglo XX, D. Watts y S. Strogatz se interesaron en el fenómeno de la sincronización que se consigue sobre un conjunto masivo de osciladores, como en los casos que recién describimos, y conjeturaron que esta era el resultado de la colaboración entre entidades individuales que interactuaban mediante una red de comunicación, por la que intercambiaban señales. Como consecuencia de esta interacción surgía la sincronización.

Los investigadores se preguntaron, ¿cuál era la estructura de esa red que favorecía el surgimiento o, para ser más técnicos, la *emergencia* del fenómeno de sincronización? Asumiendo la existencia de dicha red, ¿qué propiedades estructurales tendría?, ¿serían estas propiedades las condiciones para lograr la sincronización? Preliminarmente, conjeturaron que una red como la que buscaban debía tener ciertas propiedades que soportaran una función de comunicación tal que cada individuo pudiera intercambiar información con el resto, sin invertir demasiado esfuerzo para ello.

Watts y Strogatz comenzaron por estudiar algunos fenómenos en los que era evidente que subyacía una red: el sistema de transmisión de energía eléctrica, la red neuronal de la especie de gusanos denominada *Caenorhabditis elegans* y la red social formada por los actores del mundo cinematográfico. Los investigadores buscaban algunas regularidades estructurales en estas redes. Concentraron sus esfuerzos en dos medidas que llamaron fuertemente su atención: la longitud promedio de trayectoria y el coeficiente de agrupamiento.

Imaginemos un sencillo experimento mental en el que tomamos a todos los actores de Hollywood y, por cada actor, dibujamos un punto etiquetado con su

nombre. Luego, si las personas que representan han trabajado juntas en alguna película, trazamos una línea o arista entre los puntos correspondientes. Decimos que dos puntos o vértices están a una distancia 1 si tienen una arista que los conecta directamente. Decimos que están a una distancia 2 si el camino más corto que los une tiene dos aristas. Podemos generalizar esta medida y decir que están a una distancia d si el camino más corto que los une tiene d aristas.

Supongamos que determinamos la distancia entre cada pareja de vértices y luego la promediamos. Llamaremos a esta medida la longitud promedio de trayectoria. Ahora, tomemos un punto o vértice arbitrario y marquemos a todos aquellos vértices con los que está conectado directamente. Luego, nos preguntaremos, ¿en qué medida esos vértices que marcamos forman una comunidad? Es decir, están conectados entre sí. Dicho de una manera muy coloquial, nos preguntamos si los vecinos de un cierto nodo también se *conocen*. Si estos vértices se encuentran fuertemente conectados diremos que tienen un coeficiente de agrupamiento elevado. En otro caso, diremos que tienen un coeficiente de agrupamiento bajo.

El modelo que recién aplicamos en nuestro experimento puede usarse, por igual, para representar y evaluar tanto la red neuronal de la especie *C. elegans* o la red de transmisión de energía eléctrica. En el primer caso, los vértices o puntos representan a las neuronas y las líneas representan las sinapsis que las conectan. En el segundo caso, los vértices representan las plantas y subestaciones eléctricas, mientras que las aristas representan a las líneas de alta y media tensión que las enlazan.

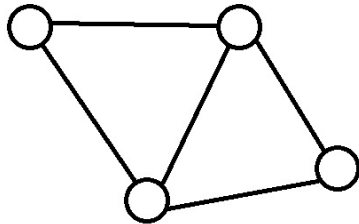


Figura 1: Grafo con 4 puntos y 5 enlaces.

Aquí hace falta, de una vez por todas, terminar de presentar un concepto con el que hemos venido trabajando y que nos seguirá reportando mucha utilidad. Nos referimos al concepto de grafo o gráfica de una red. Se define por un conjunto de puntos o vértices, también denominados nodos, y por un conjunto de aristas o enlaces que unen a algunas parejas de vértices. Así que el modelo que usamos para describir la red de distribución de energía, la red neuronal de los gusanitos *C. elegans* y la red de los actores de cine

es, en realidad, un grafo. Los grafos nos sirven para describir muchas más redes, por ejemplo, las redes de transporte de vehículos, las redes de telecomunicaciones como la Internet, las redes sociales y las redes de ligas entre páginas web.

Watts y Strogatz encontraron que, en todos los casos que estudiaron, los grafos subyacentes estaban caracterizados por una baja longitud promedio de trayectoria y un coeficiente de agrupamiento entre medio y alto. Situación a la que se denomina el fenómeno de los *mundos pequeños*. A todos nos ha pasado, alguna vez, que conocemos a una persona y, luego de algunos minutos en los que intercambiamos datos personales, resulta que esta persona también es conocida de alguno de nues-

tros conocidos. Entonces decimos sorprendidos: ¡qué pequeño es el mundo!

El fenómeno de los mundos pequeños se caracteriza por presentarse en grafos con un número muy grande de vértices en los que, sin embargo, la distancia entre cualquier pareja es muy pequeña. Pero, además, se observa la existencia de racimos o comunidades de vértices densamente conectados. Esto es, un coeficiente de agrupamiento entre moderado y alto. Los grafos de mundos pequeños se presentan tanto en situaciones tomadas de la naturaleza como en construcciones sociales.

En los años sesenta del siglo XX, el psicólogo Stanley Milgram formó un grupo de voluntarios a los que les entregó un paquete etiquetado con el nombre y la dirección de otra persona. A cada uno de los que participaron en el experimento se le pidió que usara solamente sus vínculos con conocidos y amistades para hacer llegar el paquete hasta su destinatario final. Milgram descubrió que, para los Estados Unidos, el paquete cambiaba de manos, en promedio, 6 veces.

Sorprendentemente, en un país que en esa época ya contaba con más de 100 millones de habitantes, la distancia entre dos personas cualesquiera era de tan sólo 6 saltos. Este es el origen de la expresión según la cual una persona se encuentra a 6 grados de distancia, a lo más, de cualquier otra persona en el mundo.

Luego de caracterizar las redes en las que estaban trabajando, Watts y Strogatz se preguntaron si existía un procedimiento que sirviera para explicar la formación de grafos como aquellos que describían los sistemas que estaban estudiando. Encontraron que, a comienzos del siglo XX, un par de matemáticos húngaros, P. Erdős y A. Renyi, habían propuesto un tipo de grafo que podía formarse como un juego de azar: se dibujan n vértices y , luego, con una probabilidad p , se conecta cada pareja.

Watts y Strogatz construyeron un grafo de tipo Erdős-Renyi (ER) por cada uno de los sistemas que estudiaron, buscando que fuera lo más parecido al grafo de cada uno de los sistemas que les ocupaban. Recordemos que Watts y Strogatz se encontraban estudiando dos propiedades estructurales de tres sistemas: la red de distribución de energía eléctrica, la red neuronal del gusano *C. elegans* y la red social de los actores de cine. Para su sorpresa, las redes ER que construyeron, buscando emular a las redes de referencia, sólo se parecían tímidamente en una de las medidas que les interesaban: la longitud promedio de trayectoria. En tanto, las redes ER mostraban un coeficiente de agrupamiento que era, al menos, un orden de magnitud menor que el que habían observado en sus sistemas bajo estudio. Fue entonces cuando decidieron proponer su propio modelo de formación de redes de mundos pequeños.

Pensemos en un grupo de, digamos, 1024 chicos a los que les pediremos que formen una gran fila en la que cada uno toca con su mano derecha el hombro del que tiene al frente. Ahora vamos a cerrar esta fila de manera que el primero de la formación toque el hombro del último. Ya tenemos un anillo. Decimos que dos chicos son vecinos si están en contacto. Ahora, puesto que se trata de otro de nuestros experimentos mentales, vamos a imaginar que cada chico tiene un par de brazos de goma. Luego, con el brazo izquierdo, cada niño hará contacto con el vecino del chico que tiene al frente.

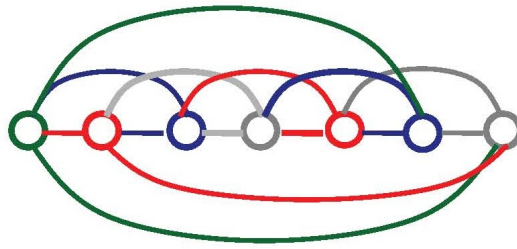


Figura 2: Representación de 7 chicos en la configuración indicada.

Si en nuestro experimento sustituyéramos a los chicos por vértices y a sus brazos por aristas, entonces tendríamos un grafo muy interesante. Por principio, es un grafo regular, porque cada vértice se conecta con tantos vértices como cualquier otro. Además, este grafo tiene un alto coeficiente de agrupamiento, porque los vecinos de cualquier nodo también son vecinos. Este fue el planteamiento original de Watts y Strogatz. Tenemos en principio, un grafo con un buen coeficiente de agrupamiento, sin embargo, la distancia entre cualquier pareja de nodos puede ser muy grande aún.

Necesitamos reducir la longitud promedio de trayectoria. Para ello, los investigadores decidieron jugar con el azar, como lo hicieron Erdős y Renyi. Realizaron un sencillo procedimiento que básicamente desconecta cada arista, por uno de sus extremos, con probabilidad p y, luego, la reconecta con un nuevo vértice, elegido también al azar. De esta forma, como en el caso de los grafos tipo ER, se produjeron atajos que reducen sensiblemente la distancia entre cualquier par de vértices.

Este es el modelo de mundos pequeños de Watts y Strogatz (WS), quienes también descubrieron que su modelo se encontraba a medio camino (o *a caballo*, como dicen los franceses) entre las redes regulares y las redes tipo ER. Descubrieron que, para valores de p relativamente pequeños, eran capaces de transformar un grafo regular en uno del tipo *mundo pequeño* pero que, para un valor de p muy cercano a 1, el grafo se transformaba en algo parecido al tipo ER. La moraleja preliminar es que las redes de mundos pequeños están a mitad de camino entre la regularidad y el desorden absoluto.

LA INEVITABLE EXISTENCIA DE LOS CHICOS “POPULARES” Y OTRAS CALAMIDADES

En este estado de cosas, L. Barabási y R. Albert argumentaron que existen otros sistemas que pueden caracterizarse por un grafo subyacente como aquellos que hemos considerado, en los que, sin embargo, el total de los vértices que forman la red depende del tiempo. Es decir, que comienzan con un grafo inicial al que se van conectando nuevos vértices, a través de un proceso de crecimiento. Por ejemplo, tomemos el caso de la red mundial de aeropuertos. Para construir un

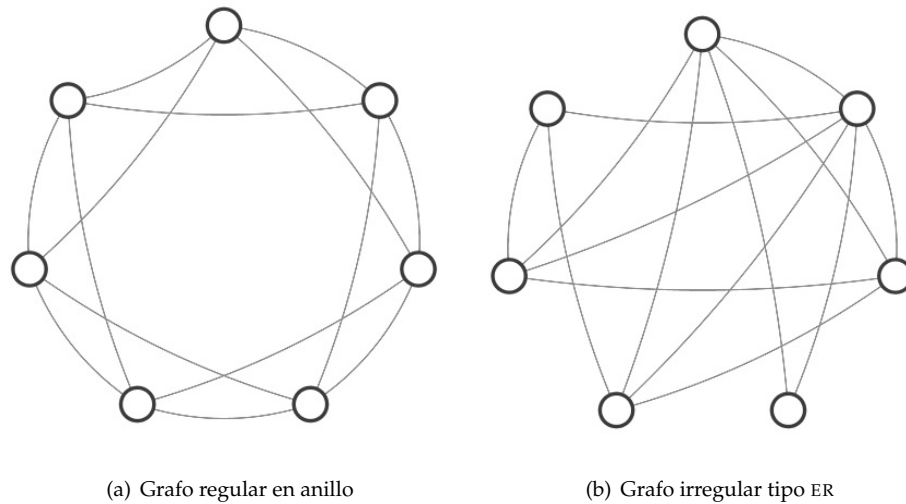


Figura 3: Grafos a partir del arreglo de la figura 2. Figuras generadas con código de Orhai (2013) para NetLogo de Wilensky (1999).

grafo que la represente dibujamos un vértice por cada aeropuerto y, luego, unimos dos vértices si existe, al menos, un vuelo comercial que enlace a los aeropuertos correspondientes. Sabemos que este grafo no siempre ha tenido el mismo número de vértices. Comenzó con unos cuantos y ha ido creciendo, poco a poco, por más de cien años.

Barabási y Albert (B&A) plantearon que en este tipo de grafos existen ciertos vértices que son *muy populares*, a los que denominaremos concentradores, los cuales se encuentran fuertemente conectados con otros vértices en su vecindad, pero además están conectados directamente con otros de su tipo en otras regiones del grafo y son, justamente, los que nos permiten encontrar un camino entre cualquier pareja de vértices porque sirven como atajos.

B&A propusieron que una red puede crecer a partir de un grafo inicial al que se van incorporando nuevos vértices. Cada uno de los recién llegados decide conectarse con los vértices que ya están presentes, con una probabilidad que es directamente proporcional al número de aristas que inciden sobre cada uno de estos. Visto de otra forma, supongamos un nuevo nodo que se incorpora al grafo y, digamos, viene equipado con dos aristas para conectarse, ¿cuál sería la forma más eficaz de usar estos dos enlaces de manera que se pueda minimizar la distancia entre éste y cualquiera de los vértices que ya existen? La respuesta es que debe conectarse con los nodos más *populares*, es decir, aquellos que estén más fuertemente conectados.

El proceso de formación propuesto por B&A tiene interesantes implicaciones. Por un lado, la formación de concentradores es una consecuencia natural del mismo proceso. Por otra parte, si decimos que un vértice es popular cuando muchas

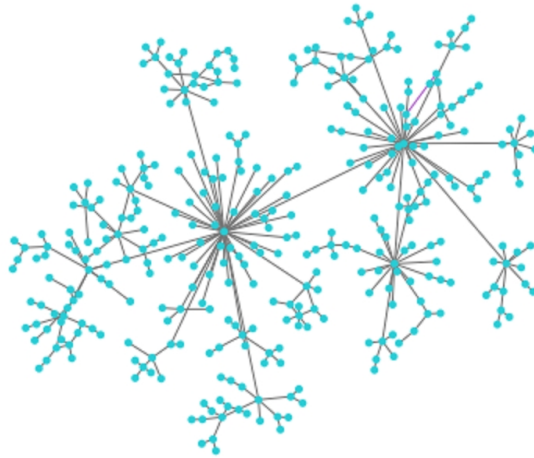


Figura 4: Grafo construido bajo el proceso de B&A. Figura generada con código de Wilensky (2005) para NetLogo.

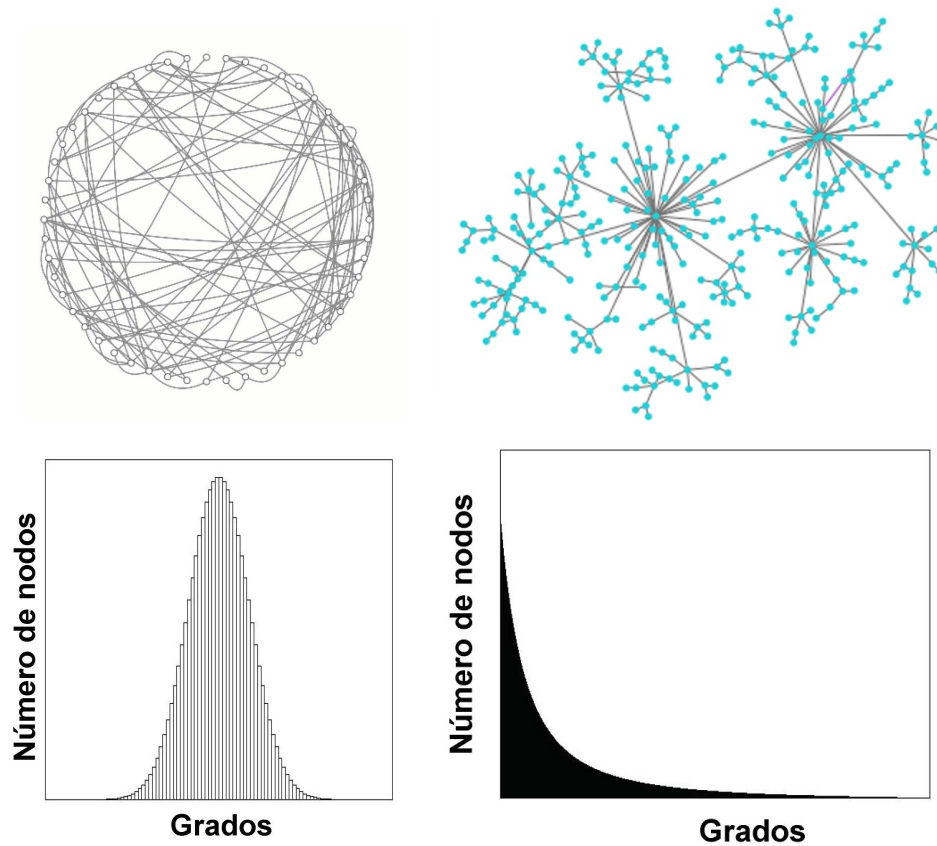
aristas inciden sobre él, lo que formalmente se denomina el grado del vértice, entonces el mecanismo de B&A da lugar a una distribución de los grados que obedece a una estadística ampliamente estudiada y que se conoce como la ley de potencias.

Una distribución de ley de potencias describe eventos en los que una variable aleatoria puede asumir valores muy altos con poca frecuencia, mientras que los valores medianos son más frecuentes y los valores bajos son mucho más frecuentes. La distribución de la riqueza en una sociedad, el número de víctimas mortales de una guerra, el tamaño de las ciudades, la intensidad de los terremotos, entre muchos otros, son variables aleatorias que obedecen a una ley de potencias.

Los científicos consideran que esta distribución es la firma personal de los patrones emergentes producidos por los sistemas complejos, compuestos por agentes que interactúan en un entorno de incertidumbres. Los agentes pueden ser neuronas, hormigas, vehículos, personas, etc. En todo caso, su interacción produce un comportamiento colectivo que se representa con una regularidad estadística que se caracteriza por medio de una distribución del tipo ley de potencias.

En el caso de los grafos construidos bajo el proceso de B&A, la ley de potencias tiene una manifestación visual muy interesante, se dice que produce una red libre de escala. Si, por ejemplo, dividimos la proporción de vértices con grado x entre la proporción de vértices con grado $10x$, encontraremos que es igual a la razón entre el número de vértices con grado $10x$ dividido por el número de vértices con grado $100x$. Dicho de otra forma, la red tiene el mismo aspecto aun si la observamos a distintas escalas o, como decimos en computación, si hacemos un *zoom-in* o un *zoom-out* sobre la misma.

Otra manera de verlo es considerar que, en cada escala con la que observemos



(a) Red irregular aleatoria y su distribución de grados normal. (b) Red real y su distribución de grados con una ley de potencias.

Figura 5: Distribuciones de grados para una red sintética y una red típica de la vida real.

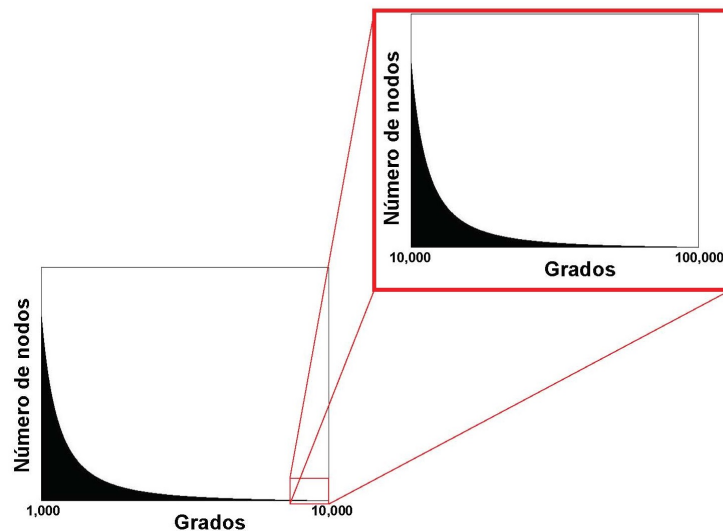


Figura 6: Distribución con ley de potencia, es decir, libre de escalas.

una red de este tipo, descubriremos la existencia de nodos concentradores. Digamos que, si vemos un detalle de la red, hay vértices concentradores muy locales, luego, al aumentar la escala detectamos zonas muy densas que corresponden a concentraciones de concentradores y, de esta forma, podríamos seguir aumentando la escala hasta observar a todo el grafo, en una sola panorámica, donde será evidente la existencia de grandes concentraciones globales.

INTERNET Y LA GRAN TELARAÑA MUNDIAL

Entonces, en 1999 vinieron los hermanos Faloutsos y descubrieron algo que para la época fue muy impresionante pero que, a la luz de lo que ya hemos discutido, nos parecerá muy razonable: el grafo que subyace en la red Internet es libre de escala. De pronto, la misma *red de redes* entraba por la puerta grande y reclamaba su lugar en el mundo de los sistemas complejos.

Si decimos que la red Internet puede describirse mediante uno de estos grafos, entonces cabría preguntarse ¿qué partes o componentes de la red representan los vértices y los enlaces? Bien, los vértices menos conectados, aquellos en la periferia de la red, representan a las computadoras o terminales con las que interactuamos en lo cotidiano. Luego, estas se conectan con un equipo de comunicaciones que, regularmente, ofrece dos funciones: proporciona conectividad local y sirve como *puerta* de salida hacia un área de mayor cobertura.

La conectividad local se refiere a la capacidad para comunicarnos con otros equipos en nuestra vecindad. La *puerta* de salida es, en realidad, un canal de comu-

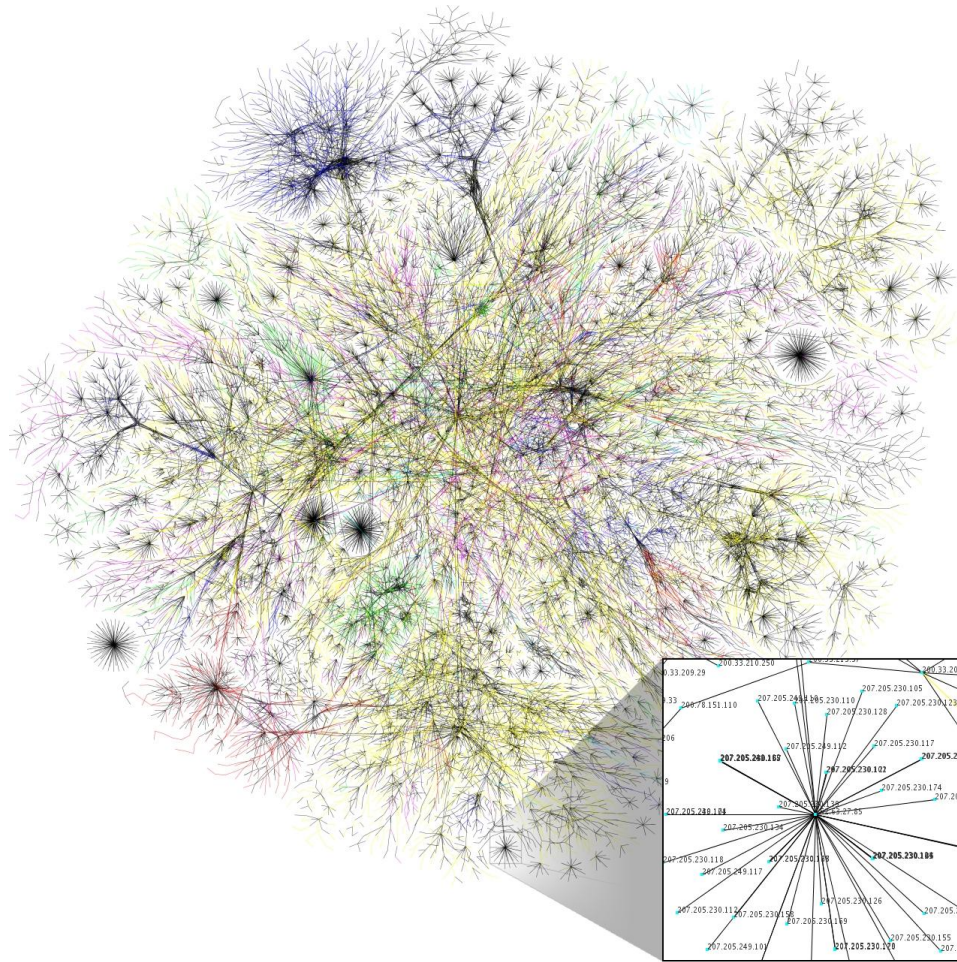


Figura 7: Representación de la Internet.

nicaciones que conecta a este vértice con otro de mayor jerarquía. Recién mencionamos que en los grafos libres de escala se observan concentradores de diferentes jerarquías. Para el caso que nos ocupa, en la cumbre de esta jerarquía, tenemos a los vértices que representan a los equipos especiales dedicados a transportar los billones de bits que viajan entre continentes cada segundo. Este selecto club de vértices interconectados entre sí, mediante canales de altísima velocidad, forma lo que se conoce como el *backbone* o la espina dorsal de Internet.

Se sabe también, por los estudios de Cohen y su equipo, que los grafos libres de escala, como aquel que subyace en la Internet, describen sistemas tolerantes a fallas pero, igualmente, son sensibles a ataques. Esto lo debemos explicar con más cuidado. Cuando hablamos de una falla nos referimos a una contingencia o eventualidad espontánea que saca a un equipo de su función regular. En contraste, un ataque es la intervención intencionada y dirigida para causar daño sobre un equipo en particular.

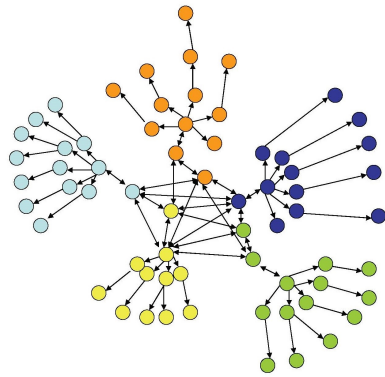


Figura 8: Grafo que representa una sección de la WWW. Con base en lo reportado por Newman (2004).

Visto de otra forma, la falla no escoge el equipo donde se presenta, mientras que el ataque es una acción premeditada que selecciona en dónde ocurrirá. Imaginemos que borramos a un vértice del grafo que representa a la Internet. En consecuencia, observamos que al borrarlo también se *caen* todas las aristas que convergen en él. Si elegimos al azar el vértice que borramos, como sucede con una falla, es muy probable que elijamos un vértice que representa a un equipo terminal, en cuyo caso el daño será local. En tanto que, si quisiéramos causar el mayor daño posible, borrando unos cuantos vértices de la dorsal de Internet dejaríamos sin comunicaciones a los equipos en una amplia región del planeta.

Más allá de la belleza estructural que exhibe la Internet, y la propia WWW que también es una red libre de escalas, los estudiosos de las tecnologías de la información se interesan en este tipo de estructuras por las importantes repercusiones que pueden tener en el funcionamiento de los sistemas de comunicación.

Existen problemas de la computación distribuida que admiten solución si se puede garantizar que todos los equipos que participan disponen de un reloj único y global que marque el avance sincronizado de todos los participantes. Entonces, sería posible que las computadoras *jugaran* a la danza del amor de las luciérnagas tailandesas, aprovechando que están comunicadas formando un *mundo pequeño*.

BIBLIOGRAFÍA

- Barabási, A. 2004. *Linked: How Everything is Connected to Everything Else*. Plume.
- Barabási, A. and R. Albert. 1999. "Emergence of scaling in random networks". *Science*, 286:509–512, Oct.
- Cohen, R., K. Erez, D. ben Avraham and S. Havlin. 2000. "Resilience of the internet to random breakdowns". *Phys. Rev. Lett.*, (85):4626–4628.
- Cohen, R., K. Erez, D. ben Avraham and S. Havlin. 2001. "Breakdown of the internet under intentional attack". *Phys. Rev. Lett.*, (86):3682–3685.
- Faloutsos, P., M. Faloutsos and C. Faloutsos. 1999. "On power-law relationships of the internet topology". *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 29(4):251–262.
- Marcelín-Jiménez, R. 2012. "Estrellas de rock de internet". *Revista ¿Cómo ves?*, (169):251–262, diciembre.
- Milgram, S. 1967. "The small world problem". *Psychology today*, 1(1):60–67, May.
- Newman, M. E. J. and M. Girvan. 2004. "Finding and evaluating community structure in networks". *Phys. Rev.* E 69, 026113.
- Orhai, M. 2013. Small world networks model. Complexity Explorer project, <http://complexityexplorer.org>. Santa Fe Institute.
- Solé, R. y S. Manrubia. 1996. *Orden y caos en sistemas complejos*. UPC.
- Strogatz, S. 2004 *Sync: How Order Emerges From Chaos in the Universe, Nature and Daily Life*. Hyperion.
- Watts, D. 2003. *Six Degrees: The Science of a Connected Age*. W. W. Norton & Company, .
- Watts, D. and S. Strogatz. 1998. "Collective dynamics of 'small-world' networks". *Nature*, (393):440–442, June.
- Wilensky, U. 1999. Netlogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/> Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.
- Wilensky, U. 2005. Netlogo preferential attachment model. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/PreferentialAttachment> Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.

EL VÍNCULO QUE NOS UNE: LAS REDES VIVAS

*Derik Castillo-Guajardo**

Estamos llamados a asistir a la Tierra para curar sus heridas, y en este proceso curar las nuestras. En verdad, abrazar la totalidad de la creación en su diversidad, belleza y maravilla. Esto pasará si vemos la necesidad de revivir nuestro sentido de pertenencia a la gran familia de la vida, con la que hemos compartido nuestro proceso evolutivo.

Wangari Maathai

★ ★ ★

EN este capítulo se exploran las interacciones entre los seres vivos, a nivel de comunidad, desde la perspectiva de las redes. Con esta herramienta podemos explicar el funcionamiento de comunidades de seres vivos. En particular se exploran redes con base en flujos de materia y energía, redes tróficas y de competidores. Al final se introduce el concepto de cascadas tróficas como tema que redondea y abarca las redes antes mencionadas. Se incluyen algunos ejemplos de cómo se han podido restaurar ecosistemas a partir del entendimiento de las redes de interacciones entre seres vivos.

EL VÍNCULO DE LOS SERES VIVOS

Durante mi juventud me llamó la atención un programa de televisión. Aparecía un personaje malo, que destruía la naturaleza sin ninguna preocupación, dejando un legado de tristes historias que involucraban a otras personas, plantas y animales que resultaban afectados. Por supuesto que el personaje no se daba por enterado. Mientras crecía el alboroto debido a los desperfectos, surgió un segundo personaje, que medita en silencio, como buscando una solución. Luego, llegó un tercer personaje explicando que todos los seres vivos estaban relacionados. El villano no lo creyó por las buenas y, entonces, los demás personajes decidieron darle una lección: le taparon la boca y la nariz con la mano, mientras le preguntaban si se daba cuenta de cuál es el vínculo de todos los seres vivos. Esta fué, para mí, una primera enseñanza de que todos los seres vivos compartimos, al menos, un vínculo.

Si queremos reconstruir la red que une a todos los seres vivos a partir de este ejemplo, encontraremos que el aire, o más precisamente el oxígeno, es como la

* Departamento de Ciencias Ambientales, División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Lerma. / d.castillo@correo.ler.uam.mx

línea que une a ciertos seres vivos. Específicamente, los organismos aerobios, es decir los que requieren oxígeno para respirar, se ven afectados por cambios en el aire, siendo la contaminación debida a la quema de combustibles fósiles el ejemplo más inmediato y dramático.

En definitiva, la disminución en la calidad del aire afecta negativamente a los organismo aerobios. Sin embargo, existen seres vivos que utilizan otros compuestos para respirar y que, en general, se conocen como organismos anaerobios. Es oportuno destacar que no estamos acostumbrados a ver seres anaerobios en el zoológico o en el jardín botánico ya que todos ellos son micro-organismos y, más específicamente, se les conoce como bacterias. La bacterias anaerobias están presentes en nuestras vidas, en al menos dos de sus representantes: son las causantes del botulismo y del tétanos. En ambos casos se trata de bacterias que producen compuestos químicos altamente tóxicos. La bacteria del botulismo se puede desarrollar en alimentos enlatados de manera deficiente. La bacteria del tétanos se puede desarrollar en la tierra y entrar en el torrente sanguíneo mediante cortes en la piel.

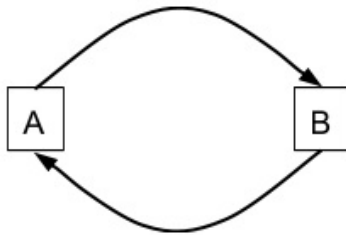


Figura 1: Diagrama de la red más sencilla entre dos grupos de seres vivos. *A* representa los productores de oxígeno y *B* representa los productores de dióxido de carbono. Las flechas indican el tránsito de materia entre los seres vivos.

Como podemos apreciar, si queremos hacer una red de los organismos usando el oxígeno como unión, dejamos de lado a una importante cantidad de seres vivos. El hecho de que no seamos capaces de observar las bacterias a simple vista no les resta importancia. Se ha estimado que la biomasa de bacterias en general es aproximadamente del mismo tamaño que la biomasa de todas las plantas. Por otro lado, una red en la que cada organismo está conectado con todos los demás, no aporta demasiada información con respecto a la forma en que tales conexiones ayudan a dar forma a las comunidades ecológicas. Es necesario buscar otros vínculos entre los seres vivos.

Con el vínculo derivado del aire, podemos armar una sencilla red de dos elementos (o vértices) y dos flechas (o aristas). Durante los estudios de biología a nivel medio superior, es fácil advertir que existe mutua dependencia entre las plantas y los animales. El oxígeno producido por las plantas es el insumo para la respiración de los animales, mientras que el dióxido de carbono producido por los animales es el insumo de las plantas. Podemos representar gráficamente a cada especie o grupo de especies con cajas y las relaciones entre ellos con flechas. Entonces podemos poner una caja con la letra *A* para las especies que producen oxígeno (y consumen dióxido de carbono) y otra caja con la letra *B* para las especies que consumen oxígeno (y producen dióxido de carbono). Para denotar el paso del oxígeno, usa-

remos una flecha que va del nodo A hacia el nodo B , es decir $A \rightarrow B$, y otra flecha para el paso del dióxido de carbono, que va del nodo B al nodo A , es decir $B \rightarrow A$ (ver figura 1).

A partir de este ejemplo, con el oxígeno como vínculo entre los seres vivos, podemos imaginar las consecuencias de las posibles alteraciones en la red. Por ejemplo, la deforestación excesiva, debida al aumento de los ambientes urbanos, puede impactar negativamente este ciclo, disminuyendo la producción de oxígeno. Por si fuera poco, las emisiones de la quema de combustibles incrementa el dióxido de carbono. Algunos estudios sugieren que este desbalance puede impactar la temperatura global y, en consecuencia, algunos patrones de distribución de las especies.

Además de la representación gráfica (grafos), el estudio de las redes en la ecología ha tomado prestadas otras herramientas, desarrolladas en la matemática, para caracterizar y estudiar algunas propiedades de las redes ecológicas. Por ejemplo, la conectividad (número de conexiones por nodo), la distribución estadística de los vínculos por cada nodo, agregación hacia una especie clave, etc.

REDES TRÓFICAS

La naturaleza de las redes en ecología es más clara cuando consideramos el alimento en lugar del aire. El origen de la red trófica puede encontrarse en las plantas, o productores primarios, entre los que encontramos desde musgos y pastos, pasando por arbustos, hasta los grandes árboles. La energía capturada por estos organismos pasa a los consumidores primarios (herbivoría), como roedores, tuzas, aves, etc.

El siguiente nivel trófico se llama de consumidores secundarios (depredadores). Los organismos que pueden comer organismos en más de un nivel trófico (polífagos), o que puede comer cualquier cosa (omnívoros), son los que más enredan las relaciones tróficas. Pongamos, por ejemplo, a los grandes felinos como los leones, quienes consumen una cantidad de individuos de otras especies como parte de su dieta.

Algunos de los animales consumidos por los leones son las cebras, los ñus, jabalíes verrugosos, y varias especies de antílopes. Supongamos que queremos dibujar la red que une todas estas especies. Si utilizamos el alimento como la guía que nos dice cuáles especies están relacionadas, podemos dibujar una línea entre el pasto y los antílopes, y otra entre el león y el antílope. Para completar, se puede usar una flecha para indicar el flujo de la materia (ver figura 2).

El tránsito de materia (o energía) entre seres vivos se conoce como la red trófica y puede ser muy intrincado. Es fácil suponer que la forma de la red trófica puede influir en las propiedades de las comunidades de seres vivos. Por ejemplo, cualquiera puede notar que las comunidades de seres vivos parecen estar en cierto estado de equilibrio. Por ejemplo, desde la perspectiva humana, el ecosistema de bosque templado ha permanecido por siglos. ¿En qué medida el equilibrio de una comunidad está relacionado con la forma de la red? A partir de esta pregunta, se desprende un vetusto interés de los biólogos sobre las causas de la persistencia de las comunidades y su estudio cuantitativo.

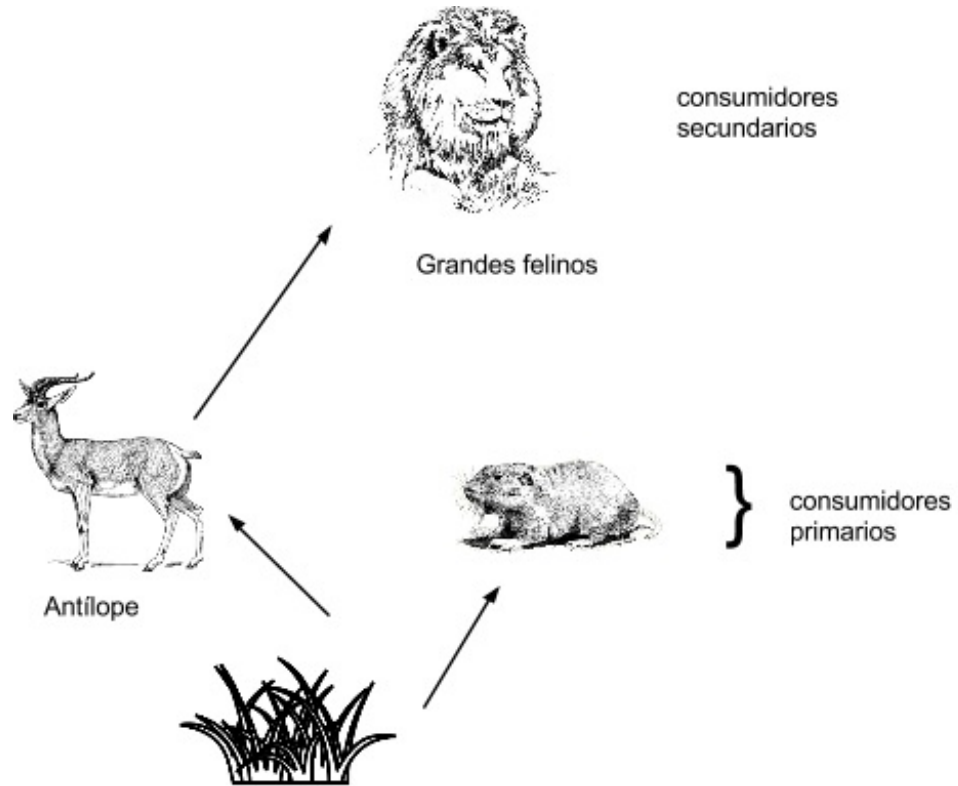


Figura 2: Red trófica simplificada, mostrando algunas de las interacciones entre los seres vivos. La flecha indica el tránsito de la materia entre dos organismos.

Ahora, este ejemplo lo podemos representar mediante la notación de cajas y flechas, y decir que tenemos una red trófica. Entonces, estaríamos en condiciones de hablar acerca de las propiedades de la red. Por ejemplo, cuán larga puede ser.

REDES DE COMPETIDORES

Pero las redes tróficas no son el único ejemplo de redes en la biología. La competencia entre especies es otro ejemplo interesante. Para facilitar las cosas, digamos que, entre todos los organismos de un bosque, podemos seleccionar un nivel trófico. Entonces podemos seleccionar a las plantas y definir las como una comunidad. Como es fácil deducir, todas las plantas necesitan esencialmente las mismas cosas para poder crecer y reproducirse (es decir, dióxido de carbono, agua, nitrógeno, fósforo, potasio, y luz de sol), por lo que es plausible suponer que compiten por estos recursos que son limitados.

En principio, se podría pensar que todas las plantas compiten entre sí, lo cual hace muy complicada la red de competidores. Algunos estudios enfatizan, sin embargo, que no todas las plantas compiten entre sí, por lo que sólo un reducido número de especies compiten entre sí de forma apreciable. El hecho de que sólo una fracción de las plantas compiten fuertemente puede ayudar a explicar la coexistencia de algunas especies en los ecosistemas. Sin embargo, hay una teoría más que vale la pena comentar: la teoría de la intransitividad.

También podemos dibujar la red de competencia entre especies usando flechas pero tomando la competencia entre pares de especies como la base para esta representación. La representación gráfica debe aportar la información sobre cuál especie gana la competencia. Si, en principio, suponemos que todas las especies compiten entre sí con la misma intensidad, entonces la pregunta que nos hacemos es ¿qué propiedades puede tener la red de competidores para que se alcance la coexistencia entre especies? Algunos estudios apuntan que la red debe tener una propiedad importante: intransitividad.

Digamos que tenemos tres especies, A , B y C , y que las tres especies compiten entre sí. En un experimento se ponen a competir dos especies, por ejemplo, dos plantas en la misma maceta. Se trata de registrar cuál especie desplaza o mata a la otra. Si la especie A es la ganadora o dominante, entonces podemos escribir $A > B$. Estos experimentos se repiten con todas las combinaciones posibles de plantas. Luego, podemos resumir los resultados en forma gráfica.

Un primer caso puede ser cuando tenemos una jerarquía de competidores; por ejemplo, si la especie A es dominante sobre todas las demás y, además, la especie B desplaza a la especie C , entonces escribimos $A > B > C$. Este patrón de desplazamientos se denomina transitivo, tomando prestado el término de las matemáticas (recordemos que la propiedad de transitividad garantiza que si $3 > 2$ y $2 > 1$, entonces $3 > 1$). En términos de la coexistencia, el resultado es fácil de anticipar: Como A puede desplazar a B y a C , y además B desplaza a C , la única especie que puede persistir es A , es decir, tenemos una mínima diversidad de especies. Este resultado se puede extender a cualquier número de especies, lo que sugiere que

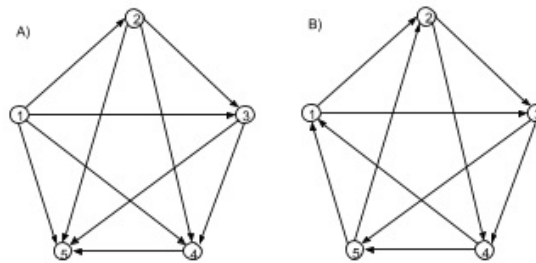


Figura 3: Diagrama de desplazamientos competitivos en una red de cinco competidores. La flecha indica desplazamiento. Es decir $1 \rightarrow 2$ indica que 1 desplaza a 2. Caso A) máxima intransitividad. Caso B) mínima intransitividad.

una red jerárquica de competidores no promueve la diversidad biológica.

Una situación completamente diferente ocurre cuando alguna especie rompe la jerarquía, de manera que todas las especies desplazan, y además pueden ser desplazadas. Por ejemplo, si $A > B$, $B > C$, pero $C > A$. En oposición al caso anterior, este patrón se denomina intransitivo. Este escenario es parecido al juego de *roca (R)*, *papel (P)* y *tijera (T)*, ya que $T > P$, $R > T$ pero $P > R$. Las consecuencias en términos de coexistencia de especies son también relativamente fáciles de anticipar: Si no hay una especie que pueda desplazar a todas las demás, entonces es posible un equilibrio en donde todas las especies coexistan, lo que maximiza la diversidad biológica.

Algunos estudios teóricos usando 5 especies con el arreglo de la figura 3 han encontrado que el número de especies en coexistencia tiende a aumentar conforme aumenta el grado de intransitividad de la comunidad de competidores. Este resultado es muy interesante en términos biológicos, ya que relaciona directamente la forma (los matemáticos la denominan topología) de la red de competidores con la coexistencia. Sin embargo, no se pueden generalizar las conclusiones, en el sentido de que no se trata de un resultado universal, y decir que todo lo que resta es encontrar la forma de las redes tróficas de todos los ecosistemas del planeta. La realidad es más compleja de lo que suponen estos modelos y el resultado pronosticado no necesariamente aplica en todas las situaciones.

Al generalizar el uso de las redes en los ecosistemas, es necesario recordar que las redes no se restringen a representar la competencia interespecífica. Como hemos visto antes, también se puede incluir la cantidad de materia o energía que transita. Cuando hablamos del tránsito de energía dejamos de lado la competencia y empezamos a trabajar con interacciones como la depredación, la herbivoría y el parasitismo. En especial, la depredación tiene un cierto carisma que llama poderosamente la atención de la gente. Muchos documentales nos emocionan con escenas dramáticas de leonas cazando cebras, o de catarinas devorando pulgones, o de arañas comiendo insectos. Entonces, no es difícil imaginar por qué las redes

tróficas han sido extensamente estudiadas en ecología.

En general, el problema del estudio de las redes es que involucra a una gran cantidad de especies. En un esfuerzo por simplificar un poco este tipo de redes, se pueden juntar todas las especies del mismo grupo taxonómico. Por ejemplo, todas las especies de arañas se pueden juntar en una misma caja. Esto tiene sentido, ya que se puede argumentar que todas las arañas tienen aproximadamente la misma función en el ecosistema: son depredadores de insectos. Pero esta simplificación también tiene deficiencias, pues otros grupos taxonómicos como las aves y los mamíferos pueden depredar insectos.

Sin embargo, este tipo de agregación permite hacer experimentos de campo en los cuales, por ejemplo, se puede medir la cantidad de insectos que consumen las arañas. Los diagramas que resultan de este enfoque están centrados en las diferentes funciones de los ecosistemas (reciclamiento, tasas de acumulación de materia) y la cantidad de materia que fluye entre ellos, por lo que se puede estudiar la importancia de grupos de especies en términos de la energía que transfieren.

PARÁSITOS EN LA RED

Se podría pensar que cuando se agrupan muchas especies en la misma caja, se simplifica la red y, por lo tanto, puede disminuir su capacidad para explicar al fenómeno. Sin embargo, hay algunos datos muy sorprendentes que nos ayudan a comprender la importancia de algunas especies estudiadas como grupo y no de manera individual. Por ejemplo, debido a que se ha puesto un gran énfasis en los depredadores, pueden llegar a olvidarse otros grupos funcionales menos atractivos, como los parásitos.

Supongamos que la materia corporal (biomasa) de cada grupo funcional es un criterio para definir la importancia de un grupo. Este supuesto se deriva de estudios enfocados en el flujo de energía. Así, para medir la importancia de cada grupo, primero, es necesario tomar a todos los organismos encontrados en un ambiente, clasificarlos por grupo funcional (productores, depredadores, parásitos, detritívoros, etc.) y, luego, pesarlos.

La sorpresa que arrojó esta metodología, por ejemplo en el estudio de tres estuarios, es que la biomasa de los parásitos fue más grande que la biomasa de los depredadores de más alto nivel como las aves. En este estudio, los parásitos se reportaron hasta 20 veces más pesados que las aves. A partir esta clase de estudios, los parásitos retomaron importancia y los parasitólogos se sienten redimidos.

Debido a su biomasa, los parásitos funcionan como reguladores de las poblaciones, ya que la energía que consumen de sus huéspedes disminuye aquella energía disponible para la reproducción o para otras actividades. Como consecuencia, cuando un organismo tiene muchos parásitos, disminuye su actividad y éxito reproductivo.

En otro estudio similar, pero realizado en las praderas, también se encontró que los parásitos tienen la mayor biomasa de todos los grupos funcionales, de lo que se concluye que, debido a que los parásitos pueden controlar el tamaño de las

poblaciones de herbívoros, contribuyen de manera indirecta, aunque medible, al control del crecimiento de las plantas.

Visto en un contexto más amplio, los cálculos sugieren que los parásitos pueden controlar indirectamente el crecimiento de las plantas en mayor medida que los mismos herbívoros. Estudios de este tipo han sido muy importantes para confirmar que la importancia del papel regulador de los parásitos se extiende tanto en ambientes acuáticos como terrestres.

Entonces, la importancia de los parásitos puede verse tanto en función de la proporción de la biomasa que abarcan como de la medida en que pueden influir en el crecimiento de otras poblaciones. Estas medidas también se aplican a otro grupo funcional en todos los ecosistemas: los degradadores. La biomasa de todos los ecosistemas debe reciclarse, de otra manera, pronto se acumularía una montaña de desperdicios de magnitud geológica. Desde este punto de vista, los degradadores son muy importantes porque *cierran* el ciclo de las redes tróficas y facilitan el flujo de materia, desde todos los niveles tróficos hacia los productores.

Entonces, podemos identificar dos lados de la redes en ecología. Por un lado, la forma (topología) en que se conectan las especies dentro de la red es importante, pues determina la coexistencia de las interacciones. Por otro lado, el número de niveles tróficos, o bien, el tamaño de la red trófica que se puede tener en una comunidad, depende de la cantidad de energía que los productores pueden capturar y fijar.

Cuando es pequeña la cantidad de energía, hay pocas especies y el número de niveles tróficos es reducido, en comparación con comunidades con una alta producción primaria. Esto es debido a la pérdida de energía durante el tránsito entre dos niveles tróficos. Las pérdidas energéticas se deben a la ineficiencia de los mecanismos biológicos para aprovechar sus fuentes de energía. Esto sucede tanto en las plantas como en los animales, y se relaciona con la segunda ley de la termodinámica.

DE LAS REDES A LAS CASCADAS TRÓFICAS

Las redes de interacciones interespecíficas nos permiten entender los efectos de impactos ambientales de acciones como la reintroducción de algunas especies. Por ejemplo, hay especies cuya importancia es desproporcionada con respecto al número de individuos. Catalogamos a estas especies como *especies clave* (*keystone*).

Para entender el papel de las especies clave, veamos algunos ejemplos ilustrativos. Por definición, cuando una especie clave es removida de la comunidad (impacto ambiental), se espera un enorme cambio en la diversidad biológica y en el funcionamiento de la comunidad. Este cambio está directamente relacionado con la red de interacciones. Los siguientes dos casos ilustran tanto el concepto de especie clave, como el de cascada trófica.

Caso 1. Los arrecifes de coral

Debido a que los arrecifes de coral necesitan aguas poco profundas y claras, el crecimiento de algas es muy rápido y puede cubrir todo el fondo marino. Entonces, los herbívoros, como los erizos marinos, juegan un papel clave al consumir las algas que crecen sobre los corales. En ausencia de los erizos, las algas pueden matar a los corales.

A su vez, los corales son refugio de peces, camarones y otras especies. Por lo que, al morir los corales, se pierde tanto la diversidad como las funciones de este ecosistema. Esta cadena quedó evidenciada en el mar Caribe cuando una enfermedad disminuyó dramáticamente la población de erizos. La velocidad con que los cambios se sucedieron fue mucho más alta que cuando una enfermedad atacó los corales.

En este caso, los efectos de una enfermedad en los erizos, se propagaron mediante la red de interacciones hasta especies tan diferentes como los peces, los crustáceos y los gastrópodos, que no se enfermaron pero que perdieron su hábitat. Los arrecifes de coral son muy importantes, de manera que se han realizado grandes esfuerzos para restaurarlos. Este esfuerzo incluye la producción en cautiverio de erizos y su introducción en los ecosistemas dañados, en lugares estratégicos, definidos por restauradores ecológicos.

Caso 2. El parque de Yellowstone

En el parque de Yellowstone, en Estados Unidos, se mataron todos los lobos de la zona. Los lobos siempre han tenido una muy mala reputación porque, cuando escasean sus presas naturales, atacan ganado de los ranchos vecinos. Debido a que también hay riesgo para los visitantes del parque, se tomó la decisión de matar a los lobos.

Una vez que se retiraron a estos depredadores, de forma natural aumentó la población de los grandes herbívoros, como los alces. Los herbívoros empezaron a ejercer una alta presión sobre las plantas. Algunos lugares fueron fuertemente afectados, de manera que había nulo reclutamiento y crecimiento de las plantas. Como era de esperarse, estas regiones sufrieron erosión del suelo por causa del agua y el viento, que pudo arrastrar la tierra, debido a que no había raíces de plantas que la retuvieran.

El esfuerzo de reintroducción de los lobos demostró la enorme importancia de tener una población de depredadores de alto nivel. Los lobos son capaces de modificar los hábitos de alimentación de sus presas y esto se puede notar en que algunas zonas, como los valles en los que había una herbivoría muy fuerte, los lobos empezaron a cazar a los alces y ciervos, pues es más fácil acorralarlos en estas topografías. Esto propició que los herbívoros abandonaran estos sitios, cesando por lo tanto, la presión sobre las plantas, que pudieron crecer sin impedimentos. La recuperación de la vegetación sobre los valles y otras zonas impidió la erosión del suelo, ya que las raíces de las plantas ayudan a consolidar el suelo.

Así, las poblaciones de herbívoros (alces y ciervos) disminuyeron un poco debido a la presión de mortalidad ejercida por los lobos. Este punto es importante ya que, antes de la reintroducción de los lobos, era necesario controlar artificialmente las poblaciones de herbívoros, lo que suponía un gran esfuerzo y gasto económico.

A su vez, la regeneración de la cobertura vegetal propició el establecimiento de poblaciones de pequeños mamíferos, como ratones, pikas y ardillas de suelo, además de las aves que anidan en el suelo ya que estos organismos se refugian de sus enemigos naturales escondiéndose debajo de las hierbas. Los pequeños mamíferos son un elemento importante para otro tramo de la red trófica, que incluye algunos depredadores terrestres como las comadrejas y otros aéreos como las águilas.

Esto significa que, además del importante efecto sobre la red trófica de los grandes herbívoros, se observó un incremento en el número de especies que habitan en esta región. Normalmente los planes de reintroducción de especies son muy complicados, debido a que es necesario restaurar las poblaciones que les sirven de alimento. En particular el caso de las águilas había recibido mucha atención, debido a que es el animal nacional pero, por lo ya expuesto, antes de la reintroducción de los lobos, la disminución de sus poblaciones resultaba difícil de impedir.

Estos ejemplos son muy adecuados para ilustrar cómo el efecto de una especie clave puede diseminarse por la red trófica y afectar muchas otras especies. A este proceso de diseminación se le conoce como la *cascada trófica*.

El estudio de las redes tróficas ha permitido afinar nuestro conocimiento del funcionamiento de nuestro entorno, de manera que nos permite tomar mejores decisiones, en cuanto al manejo de nuestros recursos naturales, y estar conscientes de que todos debemos participar en el mantenimiento y restauración de nuestro ambiente ya que, al fin y al cabo, estas acciones redundan en nuestro propio bienestar.

BIBLIOGRAFÍA

- Knowlton, N. 2001. "Sea urchin recovery from mass mortality: New hope for caribbean coral reefs?" *Proceeding of the National Academy of Sciences*, 98(9):4822-24.
- Kuris, A. M., R. F. Hechinger, J. C. Shaw, K. L. Whitney, L. Aguirre-Macedo, C. A. Boch, A. P. Dobson, E. J. Dunham, B. L. Fredensborg, T. C. Huspeni, J. Lorda, L. Mababa, F.T. Mancini, A.B. Mora, M. Pickering, N.L. Talhouk, M.E. Torchin and K.D. Lafferty. 2008. "Ecosystem energetic implications of parasite and free-living biomass in three estuaries". *Nature*, (454):515-518.
- Purves, W. K., G. H. Orians and H. C. Heller. 2012. *Life: The Science of Biology*. W. H. Freeman.

TEJIENDO LA RED SOCIAL: INDIVIDUOS COMPLEJOS EN MUNDOS COMPLEJOS

Lidia Ivonne Blásquez-Martínez*

El mundo no es un continente sólido de hechos, espolvoreado con unos pocos lagos de incertidumbre, sino un vasto océano de incertidumbres, salpicado de unas pocas islas de formas calibradas y estabilizadas.

Bruno Latour

* * *

EN las ciencias sociales, salvo tal vez en algunos casos la economía, el modelo cartesiano siempre tuvo dificultades para generar leyes y explicaciones universales sobre el comportamiento individual y colectivo. La maraña de sentimientos, ideas, recuerdos y símbolos que habitan en la cabeza de cada persona y lo motivan a actuar, son a la vez únicos, pues corresponden a la historia individual, pero también son colectivos en tanto que constituyen lo que los antropólogos llaman cultura. E.B. Tylor en 1871 la definió como el “complejo que incluye el conocimiento, las creencias, el arte, la moral, el derecho, las costumbres y cualesquiera otros hábitos y capacidades adquiridos por el hombre en cuanto miembro de una sociedad”. Podemos ver a la cultura entonces como una red que nos conecta a través de significados comunes y de formas de ver la vida, esto también coincide con la definición de complejo, si retomamos la de un *todo entrelazado*.

LA CONTINGENCIA DE LO REAL

La cultura nos plantea un problema singular al ser definida como red de significados o, desde otro ángulo, como tamiz que filtra nuestra relación individual con el mundo y que permite su inteligibilidad. Así, lo natural siempre está mediado por la cultura y nuestro sistema de pensamiento. Ciertamente, como lo dice Edgar Morin, el mundo cartesiano que operaba a través de la disyunción, la reducción y la abstracción, permitió al mundo occidental analizar los fenómenos físicos y naturales desde su más simple estructura, lo que permitió entender a muchos de ellos de manera aislada y generar leyes, lo que, traducido en la técnica, posibilitó un avance enorme en la tecnología. Sin embargo, esas parcelas bien medidas

* Departamento de Procesos Sociales, División de Ciencias Sociales y Humanidades, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Lerma. / lblasquez@correo.ler.uam.mx

y comprendidas no son la realidad, en ésta siempre hay elementos que escapan al cálculo o las previsiones de los científicos. Los físicos llaman a esto principio de incertidumbre mientras que algunos sociólogos lo llaman contingencia.

La historia de las ciencias sociales evidencia claramente que, por más esfuerzos que hicieron los científicos positivistas, no podían calcular, prever o determinar los fenómenos de esta esfera del conocimiento. Llevaron a la práctica múltiples tentativas, como establecer una jerarquía entre sujetos de estudio, como por ejemplo, sociedades “primitivas”, según los antropólogos, vs. sociedades “civilizadas”, según los sociólogos, pero no eran más que divisiones arbitrarias que derivaban de una tradición cultural occidental que desdeñaba el conocimiento de otros grupos humanos, en tanto que no estaba centrado ni en la especialización de la técnica ni en el crecimiento económico.

Asimismo, una jerarquización evolucionista, que trataba de situar a los diferentes grupos sociales como una sucesión de etapas de desarrollo, mostró que se guiaba por el mismo etnocentrismo occidental que valoraba ciertos aspectos culturales como más valiosos que otros y que no reconocía las contribuciones de otras tradiciones culturales al conocimiento global. En otro tenor, la óptica funcionalista que mostraba que cada práctica y rasgo cultural servía para algo concreto en la sobrevivencia del grupo, quedaba muy limitada como explicación. Sobre todo cuando el estructuralista, Claude Lévi-Strauss mostró, en su texto *Eficacia simbólica*, que la cultura servía para pensar y que lo simbólico no sólo eran creencias que podían ser empaquetadas en un conjunto de magia, supercherías o misticismo, sino que ordenaban el mundo social de forma tan poderosa que podían influir los procesos naturales de los que formaban parte los individuos.

La ruptura del sueño moderno nos hizo cuestionarnos sobre si la acumulación, la explotación intensiva de los recursos naturales y la desigualdad entre los diferentes agrupamientos humanos, basada en dicha capacidad de explotación era válida a costa de la pérdida de la calidad de vida y la capacidad de carga de la Tierra. Es en ese momento que nuestros propios conocimientos son cuestionados y se evidencian sus limitaciones. También, poco a poco, reconocemos la incertidumbre como parte inherente a los procesos y nos abrimos a las explicaciones que otras culturas dan a dichos fenómenos y lo que pueden contribuir a su entendimiento.

Bruno Latour, antropólogo y teórico del actor-red, retoma la incertidumbre como factor esencial en la construcción de las ciencias sociales, tratando de mostrar que cuando los científicos sociales la aceptan y acogen, esto puede dar una comprensión más profunda de los fenómenos sociales, al no tomarlos por dados y permitir que su lógica interna aflore y los entendamos desde dentro. En este sentido, Latour plantea cinco formas de incertidumbre que, si son reconocidas por el estudio de los fenómenos sociales, pueden ayudarlo a comprender la complejidad. Estas son:

1. La naturaleza de los grupos. Los agrupamientos de individuos no pueden clasificarse por una esencia característica: ni étnica, ni de clase, ni de naturaleza. No son unidades fijas y limitadas. Podemos decir que los grupos sociales son avatares de estas conexiones y desconexiones que unen o separan a los

individuos, formando colectivos con orientaciones específicas de la acción.

2. La naturaleza de las acciones. La orientación de la acción, en otros términos, la agencia no puede ser definida de una forma causal y directa. Es decir, siempre hay una incertidumbre al analizar por qué alguien o un grupo de personas actuó de una u otra forma. No se puede simplificar a un elemento psico-sociológico o de otro tipo. Es importante que los científicos sociales analicen diacrónicamente los procesos de cambio social para comprender por qué un grupo social actúa de una forma específica.
3. La naturaleza de los objetos. Los actores transmiten la orientación de la acción (sentido y fuerza) en un proceso que involucra la interacción de los individuos y la transferencia de los significados, como sería en el caso del poder. Es por esto que un actor puede ser tanto individual como colectivo y pareciera que espontáneamente dichas escalas (individual-colectiva) encuentran sintonía cuando se trata de una demanda social o del surgimiento de nuevas prácticas.
4. La naturaleza de los hechos. Los “hechos científicos” no carecen de zonas de duda. En efecto, la ciencia se construye relativizando, manejando o ignorando los elementos que no pueden ser definidos o calculados certeramente. El avance en la ciencia implica que, gracias al cambio social y la transformación cultural, nuevas interpretaciones surjan que permitan dar explicaciones que llenen estas zonas de duda. En otras palabras, la ciencia no está desconectada de la cultura y los procesos sociales.
5. Escribir explicaciones arriesgadas. No hay que caer en la trampa de la objetividad, pues la subjetividad es un elemento que permite la traducción de los fenómenos sociales a explicaciones más comprensivas y desde un enfoque más complejo.

Estas cinco fuentes de incertidumbre nos muestran que la realidad es fluida y volátil. Es decir, lo que consideramos un objeto como unidad autocontenida, con fronteras y características específicas –y aquí no hacemos diferencia entre un artefacto o una investigación– puede, en cualquier momento, desestabilizarse y ya no funcionar como se espera que lo haga. Los cambios se suceden rápida e imperceptiblemente, lo que hace que el método cartesiano tenga importantes limitantes para aprehender esa ola de eventos que componen los fenómenos naturales o sociales.

Además, es interesante tener presente una dimensión inherente a muchos de los procesos que construyen y moldean el conocimiento y la evolución de la tecnología. Latour muestra que la ciencia es un hecho político y no un campo inocuo en donde se acumula y se desarrolla el conocimiento. Los descubrimientos científicos y los inventos tecnológicos siempre se desarrollan en contextos en donde no sólo los científicos son los actores de este escenario, se involucran financiadores, lobbies (representantes especiales de grupos con intereses comunes), defensores de la moralidad, hombres políticos y gobiernos que orientan el tipo de investigaciones,

es decir, se priorizarán aquellos temas que tendrán un impacto en la agenda de gobierno, que puedan dar ventajas en el mercado o que optimicen el uso de los recursos. Asimismo, se evitarán aquellos que cimbrén algunos valores religiosos o los intereses de ciertas clases. Esto no quiere decir que se detengan las transformaciones, pero sí pueden frenarse o puede cambiar su orientación.

ECOLOGÍA POLÍTICA

La ecología política da ejemplos interesantes sobre la red de conexiones entre los mundos social y natural y sus influencias mutuas. Por ejemplo, si nos preguntamos sobre la historia del plátano, que forma parte de nuestro desayuno y del de millones de personas en el mundo.

Paul Robbins nos explica cómo este fruto es originario del sudeste asiático y cómo los comerciantes lo dispersaron a África y el Mediterráneo. Los españoles lo llevaron por primera vez, en 1516, a Dominicana. Luego, se expandió por toda la Nueva España, adaptándose maravillosamente a los ecosistemas y siendo del gusto de los pueblos originarios.

Componente del mestizaje culinario, las poblaciones africanas aportaron a nuestra gastronomía recetas con múltiples variedades de bananos. Hasta aquí, el plátano tenía una historia bastante convencional de difusión como otros frutos. Sin embargo, para 1870, llegó al mundo anglosajón, como producto exótico y novedoso, y apareció en los estantes de los mercados de Nueva York. Una campaña masiva y bien dirigida, así como la aceptación de los consumidores, hizo que su éxito fuera tal que, en 1899, se funda una de las más poderosas transnacionales de la historia mundial, la *United Fruit Company* o UFC, también conocida como “la Chiquita”.

Para inicios del siglo XX, los plátanos eran la fruta más popular tanto en los Estados Unidos como en el Reino Unido. Esto motivó el crecimiento acelerado de plantaciones monumentales en los países tropicales, para satisfacer la demanda mundial. A la par, se desarrolló tecnología en agronomía para producir más eficientemente este fruto que tiene una reproducción un tanto singular. Las plantaciones se localizaron mayormente en Centroamérica, donde modificaron paisajes y arrasaron con ecosistemas.

La UFC tenía tal influencia en la economía regional, en la generación de empleos y en el mercado de tierras, que se permitía el lujo de poner y quitar gobernantes, a su gusto, privilegiando sus ganancias económicas. De ahí surge el término despectivo “república bananera” para calificar a un gobierno autoritario, frágil y dependiente, que promueve la desigualdad sistemática, pues los privilegios de la oligarquía local están condicionados a las decisiones de las transnacionales con respecto a los ingresos derivados de ciertas materias primas.

Actualmente, el cultivo del plátano de exportación lo sigue encabezando América Latina, con 80% del mercado, teniendo como principal productor a Ecuador. En otros continentes los principales productores son Filipinas, Camerún y Costa de Marfil. Por otro lado, los principales importadores de plátano son los Estados Unidos, la Unión Europea, Japón y Rusia. Los ingresos de este comercio sumaban en

el 2000 un estimado de cuatro billones de dólares, manejado por un puñado de compañías, las más poderosas transnacionales históricas, como la UFC.

CONTINGENCIAS HUMANAS Y ECOLÓGICAS

En el ejemplo del plátano, con base en la breve historia socio-ecológica que hace Paul Robbins en su *Enciclopedia del ambiente y la sociedad*, podemos ubicar algunos procesos de incertidumbre esbozados por Latour. En realidad, varios procesos de incertidumbre se encuentran entrelazados como un todo complejo pero, para efectos prácticos, trataremos de esquematizar dos.

Por una parte, la naturaleza de los hechos. No sabemos por qué el plátano ganó rápidamente el gusto de todos los pueblos en donde llegó. Se dice que cuando llegó a América el cultivo de la fruta se esparcía tan rápido que su avance era más acelerado que el de los conquistadores. Podemos hacer especulaciones y plantear explicaciones científicas del por qué, pero no serían más que elucubraciones: su alto contenido en carbohidratos y fósforo, permitía un aporte importante de calorías y vitaminas; su sabor azucarado es agradable al paladar; puede crecer fácilmente en ambientes húmedos y tropicales; y es una fruta de fácil conservación porque en su cáscara se conserva varias semanas y aun estando muy madura puede freírse u hornearse manteniendo un sabor agradable.

Si pensamos en lo que nos ofertan actualmente los supermercados, que en realidad son una variedad limitada de productos frescos y granos, es común que observemos olas de productos “de moda”. Por ejemplo, llegan a los estantes el arándano, el jengibre o la quinoa, que no estaban incorporados a nuestra dieta; o la chía que, por el contrario, se había perdido. Muchas veces los buscamos porque se propagan los consejos en los medios de comunicación, en las redes sociales o hasta nuestros médicos nos los recomiendan, señalando una serie de beneficios para la salud. Sin embargo, nunca entran completamente a nuestra dieta y rápidamente son sustituidos por otros productos-tendencia. Así, el éxito global del plátano parece no tener explicación, sin embargo, el ávido gusto que tenemos por esta fruta ha gestado gigantes multinacionales para cubrir la gran demanda.

Por otro lado, tenemos la naturaleza de los objetos. Como ya lo hemos dicho, el plátano es una de las frutas con mayor peso económico en los mercados. Durante el siglo XX, su cultivo extensivo obstaculizó la consolidación de las democracias en Centroamérica e impuso gobiernos autoritarios y oligárquicos, signo del imperia-lismo estadounidense. Aún hoy, las decisiones de “la Chiquita” tienen importantes consecuencias en el mercado. Como cuando en el 2014, rompieron tratos con Fyffes, su símil europeo en la producción y distribución de plátanos, para hacer una fusión que les permitiera pagar menos impuestos. Sin embargo, “la Chiquita” decidió aliarse con Cutrale-Safra, compañía brasileña especializada en el procesamiento de jugo de naranja. Aquí observamos cómo los actores dan una orientación a la acción, es decir, el gusto por el plátano, que va convirtiendo a esta fruta en un “oro azucarado” que revoluciona los medios de producción y los mercados para cubrir la demanda de los consumidores.

LA COMPLEJIDAD DE LA SOCIEDAD GLOBALIZADA

Como podemos ver, los hechos sociales están interconectados con hechos naturales y viceversa, los avances tecnológicos modifican las prácticas sociales y la forma en cómo representamos al mundo, a su vez, los impactos de la tecnología modifican los ecosistemas y paisajes. En el pasado, estos procesos de cambio tomaban más tiempo puesto que pocos eran los individuos que podían viajar e intercambiar sus formas de vida. Actualmente, la distancia ya no es un obstáculo y podemos compartir nuestras ideas, conocimientos, creencias y nuestro acontecer cotidiano, sólo con apretar el botón *send* en nuestros teléfonos celulares o computadoras.

Los procesos sociales siempre han sido complejos, solo que hoy en día se evidencian más claramente las conexiones e interconexiones que se tejen en torno a las diversas culturas, formas de consumo, grupos de edad, sectores sociales e ideologías. Como lo hemos expuesto, muchas veces es difícil distinguir si un proceso es exclusivo del ámbito social, natural o científico. La mayor parte de las veces al interior de los procesos se entretajan fenómenos sociales, naturales, científicos, culturales y biológicos, entre otros muchos.

Por todo ello, las diferentes perspectivas de la complejidad, desde el enfoque de Morin hasta aquellos como el de Bruno Latour, representan propuestas para que podamos pensar fenómenos emergentes desde una perspectiva más holística y tener una comprensión más profunda de la realidad.

BIBLIOGRAFÍA

- Latour, Bruno. 2005. *Reensamblar lo social. Una introducción a la teoría del actor-red*. Ediciones Manantial SRL.
- Morin, Edgar. 1984. *Ciencia con consciencia*. Anthropos.
- Robbins, Paul. 2007. *Encyclopedia of Environment and Society*. Sage Editors. Paul Robbins (ed.).

EL JUEGO DE LOS REFLEJOS: EVOLUCIÓN BIOLÓGICA Y CULTURAL

Celia Oliver-Morales[‡]
César A. Abarca-García[§]

En donde la mayoría ve orden, nosotros observamos el caos.
Los autores (a partir de una frase de Francis Bacon).

* * *

*A Emilia y Sebastián,
ambos Abarca Oliver,
ambos los más amados.*

INDEPENDIENTEMENTE de que resulta más obvio darse cuenta de la diversidad biológica y cultural en la que estamos inmersos cuando viajamos y hacemos comparaciones, cualquier exploración de nuestro mundo nos muestra que éste es así o, mejor dicho, que se ha vuelto así: basto, diferente, abundante y cambiante. El hecho de formar parte de la variedad planetaria, en donde los múltiples elementos que la componen establecen la complejidad de sus relaciones, ha hecho que los seres humanos, desde nuestros más tempranos inicios como verdaderos *sapiens*, nos hayamos preguntado casi de manera obsesiva acerca de quiénes somos. Pues es, justamente, en el estudio de la evolución biológica y cultural, un área contemporánea del conocimiento, donde este tipo de preguntas gigantescas intentan ser resueltas.

En este capítulo partimos del supuesto de que es imposible entendernos culturalmente si antes no somos capaces de reconocernos y estudiarnos como seres biológicos. Hecha esa importante aclaración, que marca un inicio conceptual, también estamos interesados en mostrar dos aspectos centrales de la evolución biológica y cultural. Por un lado resaltar que, gracias al trabajo de muchos, contamos con un marco teórico muy robusto para comprender quiénes somos como individuos,

[‡] Licenciatura en Ciencias Ambientales y Cambio Climático, Colegio de Ciencias y Humanidades, Universidad Autónoma de la Ciudad de México. / Centro Darwin de Pensamiento Evolucionista, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. / oliver.celia@yahoo.com

[§] Centro Darwin de Pensamiento Evolucionista, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. / Dirección General de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable (GDF), Dirección de Recursos Naturales y Desarrollo Rural, Departamento de Redes del Conocimiento en Evolución Biológica y Cultural. / abarca.cesar@hotmail.com

como especie y cuál es nuestra relación con los demás seres y con el planeta que compartimos. En segundo término, demostrar que la teoría de la evolución sigue siendo unificadora más allá de la biología, pues ahora no sólo dialoga con otras ramas de la ciencia como la física, la química o las matemáticas, sino con diversas áreas del saber que tradicionalmente se perciben como más alejadas y que incluyen a las ciencias sociales, las artes y las humanidades.

LA FUSIÓN QUE VIENE

Queremos mostrar cómo es que se fue construyendo la teoría de la evolución, pero no de la manera más tradicional y reiterativa –eso se puede consultar en casi cualquier libro de texto y en casi todos viene lo mismo–. Un verdadero estudio histórico en ese sentido valdría mucho la pena, pero por ahora no tenemos las herramientas necesarias del buscador de ese tipo de tesoros. Con lo que sí contamos, además del atrevimiento, es con reflexiones de los conceptos que nos parecen claves para comprender, de manera novedosa, la teoría de la evolución sin tener por qué perdernos en los detalles. Uno de esos conceptos, que pensamos son torales, se desprende de la forma en que hemos construido el conocimiento. En términos generales, pasamos de la ciencia, rica en reflexiones, a la técnica, que puede resultar ser una versión empobrecedora.

Lamarck, un brillante y denostado naturalista francés, que nació a mediados del siglo XVIII y murió en el siguiente, lo percibía con toda claridad ya desde su época. Dos colegas nuestros (Ricardo Noguera y Rodrigo Bustillo, ambos académicos del laboratorio de historia y filosofía de la biología, de la Facultad de Ciencias de la UNAM), que se han dedicado a desenterrar a Lamarck desde las fuentes originales, lo describen de la siguiente manera, citando literalmente a Richard W. Burkhardt Jr.:

Lamarck se vio a sí mismo como alguien que juega un rol intelectual especial de mediador entre las amplias preocupaciones del filósofo y los estudios detallados del naturalista. Conforme se esforzó en entender temas como la naturaleza de la vida y el origen de las facultades mentales, insistió en que estos temas eran concernientes al estudio de un zoólogo. Más allá de esto, se encontraba convencido de que aquello que conocía como zoólogo le permitía ir más allá de los puntos de vista de los filósofos, quienes se habían interesado en estos temas antes que él. [...] Como filósofo-naturalista de estilo propio, Lamarck se felicitó a sí mismo por haber descubierto grandes verdades, las cuales los filósofos no podrían haber descubierto, pues no han observado suficientemente la naturaleza, y las cuáles los zoólogos no podrían haber percibido pues se han ocupado demasiado en asuntos muy detallados.

A pesar de las claras advertencias de Lamarck, en muchos lugares del planeta (de los que México ocupa un lugar preponderante) se ha orientado la formación de científicos hacia la de técnicos especializados. Eso es grave, pues un estudiante que está más interesado por aprender una técnica (por más novedosa que sea) que por explorar una idea (por más absurda que parezca) responde bien a ciertos intereses

de mercado, pero nunca a la de nuevos esquemas, que son los que siguen siendo necesarios para comprender a la naturaleza.

Antes de continuar, también hay que decir que además es importante hacer filosofía de la ciencias por algo que, aunque es obvio, se nos olvida con bastante frecuencia: el hecho de que los científicos trabajamos a partir de teorías. Como sabemos, muchos de los conceptos con los que se construye una teoría, están impregnados de los preceptos morales de la época en que fueron desarrollados. La evolución no es la excepción. Dos aproximaciones distintas lo ejemplifican muy bien.

En la actualidad, por ejemplo, nos referimos a los individuos que tienen relaciones sexuales con otros de su mismo sexo como "homosexuales". Al mismo comportamiento, pero en otros animales, le llamamos distinto: *interacciones sexo a sexo*. Aparentemente, somos incapaces de reconocernos en el otro. En un sentido completamente opuesto, recientemente se ha tratado de mostrar que algunas conductas que se pensaban exclusivamente humanas, como la moral, tienen importantes bases biológicas que compartimos con otras especies de mamíferos.

Por tales motivos, proponemos tratar al trabajo científico como un gran experimento epistemológico. La evolución biológica y cultural (en tanto área de fusión de distintos campos como las neurociencias, la arqueología, la filosofía, la historia, la biología, la psicología y muchas más), es un campo muy fecundo para formarse como el *científico filósofo* del que hemos estado hablando. Tal es nuestra propuesta. Hablaremos de esta primera fusión a lo largo de todo el capítulo. Por lo pronto, hay una fusión particular que presentamos a continuación: la de Lynn Margulis, una famosa microbióloga interesada en la evolución, quien habló muy alto.

ACERCA DE UNA FUSIÓN QUE CAMBIÓ LA VIDA PLANETARIA: CUANDO LOS ALEBRIJES SE FORMARON

Las ideas revolucionarias de Wallace y de Darwin son un hito en la historia del pensamiento humano. Es una verdadera lástima que casi nunca se le reconozca al primero, al menos no con la misma importancia que al segundo. Borrar a uno u otro de la historia y de las aulas de clase significa perderse de contribuciones igualmente gigantescas. Ambos inauguraron una nueva forma de pensar, a partir del siglo XIX, y pusieron varias cosas en claro. Entre ellas, propusieron dos ideas que nos gustaría resaltar. Una es la de la evolución por selección natural y la otra la de un ancestro en común.

Aunque analizar a ambos autores exclusivamente por estas dos ideas es caer en un reduccionismo extremo, vale la pena resaltar que, además de ser las más contrastadas en la ciencia, las dos resultaron ser ciertas y piezas clave. El ulterior avance de la ciencia hizo crecer el paradigma evolutivo pero no hubo necesidad de sustituirlo. Por ejemplo, durante la llamada síntesis moderna de la evolución, que ocurrió a finales del siglo XIX, algunos de sus principales exponentes cuestionaban la contribución relativa de las fuerzas que producen evolución, pero nunca su existencia. Por más acaloradas que fueran las discusiones, no eran hipótesis al-

ternativas, sino posibilidades de la misma teoría. De igual manera, durante algún tiempo se discutió acerca de si el proceso evolutivo ocurre de manera continua o a grandes saltos. Ahora sabemos que ocurre de las dos maneras y que varios mecanismos no excluyentes la producen. Para mostrar a lo que nos referimos, hemos decidido utilizar, a manera de ejemplo, uno muy importante pero paradójicamente poco usado, el de la teoría de la endosimbiosis.

Hace aproximadamente 3,500 millones de años se originó la vida en la Tierra. En esa época, todos los organismos eran unicelulares (en biología los nombramos como procariontes). Entre los organismos procariontes más antiguos se encuentran las cianobacterias y las espiroquetas. Mil millones de años después surgió otro tipo de células, que fueron las que dieron origen a todos los organismos multicelulares como los hongos, las plantas y los animales. Sin embargo, hay que aclarar que también hay organismos unicelulares con este tipo de células como, por ejemplo, las levaduras que usamos para hacer pan. Con su surgimiento, hubo una explosión evolutiva, de tales dimensiones, que la vida colonizó toda la Tierra, se transformó y modificó al planeta por completo.

Como lo demostró magistralmente Lynn Margulis, mediante pruebas científicas que han sido irrefutables, la creación de este tipo de células que conocemos como eucariontes (y que son las que nosotros poseemos), ocurrió por la fusión de distintas células procariontes unicelulares. Es decir, a partir de células individuales con distintas formas y funciones que, al juntarse, crearon formas y funciones que antes no existían. Si nos visualizamos, desde este punto de vista, resulta que somos verdaderas quimeras vivientes, ¡alebrijes multicelulares en toda la extensión de la palabra! Después de saber esto, la propia idea de la individualidad, tan preciada por nosotros, cobra un sentido filosófico completamente distinto. Después de lo dicho, no debe de quedar duda de la importancia de las interacciones biológicas como agentes enormes del cambio evolutivo.

Uno de los aportes teóricos más importantes de L. Margulis respecto a lo propuesto por Wallace y Darwin –y posteriormente por la mayoría de los científicos involucrados en la síntesis moderna o neodarwinismo– es que las novedades evolutivas, que constituyen las grandes transiciones de las que hablaba Maynard Smith y Eörs Szathmáry, podían darse por fusión de organismos y no solamente por la acumulación de cambios graduales a través del tiempo. A pesar de ello, quisiéramos recalcar lo que hemos venido diciendo: no es que la selección natural y otras fuerzas evolutivas no actúen sobre las novedades evolutivas propuestas por Margulis, ni tampoco que los cambios graduales no existan. Ambos hechos están plenamente comprobados empíricamente.

Por lo tanto, el mismo marco teórico gigantesco, que nació hace más de ciento cincuenta años, no sólo se ha robustecido sino que además sigue creciendo. Ciertamente que, como científicos, debemos estar preparados por si alguien cambia nuestra percepción de las cosas –nosotros mismos pensamos constantemente en cómo o en qué está mal– pero es igualmente cierto que hasta ahora nadie lo ha vuelto a hacer tan radicalmente como Wallace y Darwin. Entonces, podemos seguir discutiendo otras ideas clave.

UNO DE LOS LADOS DE LA MISMA MONEDA

Es común que entre los biólogos se hable de la diversidad biológica como si esta no tuviera ningún límite y todo fuera posible. Algunos biólogos evolutivos se han dado cuenta de esto, además de varios biofísicos y biomatemáticos a los que no les convence nada esa forma de ver las cosas. Tan no están de acuerdo con esa visión de la naturaleza que, por ejemplo, usan la palabra *aparente* para referirse a la diversidad de formas que hay en la naturaleza. Nosotros estamos parcialmente de acuerdo con ellos.

A todo el conjunto de imposibilidades le vamos a llamar restricciones. La primera está presente en el origen de la vida y nos revela al ancestro común que tenemos todos los organismos, así como nuestro gran parecido o similitudes. En un curso introductorio de bioquímica se ve algo que no puede pasar desapercibido para ningún estudiante, el hecho de que todos los organismos estamos constituidos de los mismos elementos químicos y, por ello, se les llama esenciales. Pero esenciales, ¿para qué? Por supuesto que para formar la vida.

Por si quedaran dudas, diremos que la ausencia prolongada de uno de estos elementos químicos puede conducir fácilmente a un organismo a la muerte. Antes de seguir, vale la pena revisar varias peculiaridades de los elementos esenciales que los hacen interesantes desde una perspectiva evolucionista. Son abundantes en el planeta, son químicamente estables, reaccionan entre ellos y, si eso fuera poco, también con el agua.

En efecto, los elementos químicos esenciales también reaccionan con el agua, que es abundante en el planeta, en la que pudo originarse la vida y que está presente en todas las células de cualquier organismo. En otras palabras, estamos hablando de que existe una base biológica, común para todos los organismos, que está dada por distintas restricciones físico-químicas. Entre ellas, la fuerza de gravedad podría constituir un ejemplo físico. Otra, pero a nivel químico y biológico, es que todos poseamos el mismo material genético y que éste sea utilizado de distintos modos a través del mismo código. Por eso es posible modificar genéticamente a un organismo introduciendo genes de otro que parece muy lejano.

Otro ejemplo más, es el que nuestras membranas estén constituidas de los mismos materiales o que compartamos muchas rutas metabólicas. Si este tipo de información la analizamos históricamente, es fácil darse cuenta por qué los biólogos afirmamos tres ideas con tanta certeza. La primera, que poseemos un ancestro en común a partir del que descendemos todos (un duro golpe para los antropocentristas). Esto, a su vez, explica la segunda, que es por qué, cuando hacemos comparaciones entre cualquier organismos, siempre hay aspectos muy similares, los mismos para todos, que son los que nos hacen semejantes.

Finalmente, la tercera idea, es que nos permite ver a la evolución como la diversificación, en el tiempo y en el espacio, de una sola especie que apareció en nuestro planeta hace aproximadamente 3,500 millones de años y que ha dado origen a todo lo que conocemos, incluyendo lo que se ha extinguido (que ha sido mucho, al menos tanto como lo que ha aparecido). De este proceso de ancestría y descen-

dencia, que ocurre cada generación, como la evolución misma, se desprenden más restricciones. Por ejemplo, las restricciones filogenéticas hacen imposible que un pez dé origen a un musgo o que de una salamandra se origine un girasol.

Aunque las restricciones que mencionamos son las más generales, eso no significa que otras no sean importantes. A modo de ejemplos breves, destacaremos dos más: las restricciones ecológicas y las genéticas o funcionales. Las primeras limitan la distribución de las especies. Debido a éstas es que cuando viajamos por la carretera entre paisajes muy heterogéneos, la diversidad biológica cambia y las especies que viven en un desierto son distintas a las que habitan en un bosque templado. Si movemos un cactus del desierto a un bosque de pino y viceversa, ninguno de los organismos que hemos trasladado sobreviviría. Por lo tanto, las restricciones ecológicas hacen que los organismos que comparten un mismo espacio se parezcan más entre sí.

Aunque podríamos escribir mucho sobre las restricciones genéticas, porque existe un número muy grande de ellas –entre las que se encuentran la epistasis y la pleiotropia–, elegimos un ejemplo directamente relacionado con la selección artificial. Esto es algo que saben muy bien los productores de plantas y animales y, sin lugar a dudas, también ha sido uno de sus grandes problemas.

Siendo productor agropecuario, a cualquier persona lo que le convendría es que en un solo grupo de organismos se desarrollen todas las características deseadas. Por ejemplo, sería excelente tener una buena vaca productora de carne y de leche. Sin embargo, como todos sabemos, eso no es posible y es la razón de que existan distintas líneas de ganado vacuno. Como seguramente ya habrán adivinado los lectores, esto también se debe a más restricciones y, en particular, a la correlación que existe entre distintos genes.

En muchos casos –como en el ejemplo de las vacas– las correlaciones genéticas son negativas y, por lo tanto, mientras más se desarrolla una característica, disminuye otra u otras. En el primer capítulo de *El origen de las especies*, Darwin habla explícitamente de ello y dice que los gatos machos, blancos y de ojos azules, siempre son sordos. Hablando metafóricamente, se nos ocurrió decir que para ser algo siempre hay que dejar de ser otras cosas. Es por ello que las correlaciones genéticas hacen que los organismos se parezcan menos a lo que han dejado de ser (debido a interacciones génicas).

También es obvio que hay diferencias y muy importantes. Es tan claro que cualquier persona puede percibirse muy distinta a todas las demás, incluso a sus padres o hermanos que son los organismos más cercanos genética y físicamente. Entonces, si somos tan parecidos, ¿qué nos hace tan diferentes? Intentemos resolver este acertijo, que es uno de los más apasionantes de toda la evolución contemporánea.

OTRO DE LOS LADOS DE LA MISMA MONEDA

La importancia de las diferencias individuales es uno de los ejes centrales de la teoría de la evolución, su presencia es innegable. Para mostrarlo con cierta claridad, le pedimos a los lectores que se transporten a un mercado. Algunos de los que nosotros conocemos son maravillosos: el de San Juan de la Ciudad de México; el de San Cristobal de las Casas, en el estado de Chiapas; o el *mercat* de la boquería de Barcelona, en España.

Ahora les pedimos que se acerquen a uno de sus puestos favoritos. –Un poco más, no sean tímidos–. Ya que están ahí, frente a su fruta favorita, escojan una. Ahora queremos preguntarles: ¿por qué eligieron esa y no otra?, ¿acaso su elección fue al azar? Aún sin saber lo que cada quien puede contestar, estamos bastante seguros de lo siguiente: Primero, que nadie escoge al azar frente a dos y, sobre todo, ante más posibilidades de fruta de la misma variedad. Si no, díganos, ¿es lo mismo llevarse una fruta con mal aspecto cuando justo a un costado hay otra que nos parece que tiene una apariencia excepcional?

Pensemos en cualquier fruta, por ejemplo, en unos higos. Nada más de pensarlo comenzamos a imaginar algunas características que nos permiten suponer cuáles serán los de mejor sabor: tal vez unos chiquitos, oscuros y algo suaves serían una buena apuesta. La respuesta final la descubriremos al probarlos.

Regresando a la pregunta original, queremos resaltar que lo que justamente nos permitió escoger son las diferencias que encontramos a nivel individual. En este caso, todos los higos se parecen en algo –y por eso los vendedores los agrupan para ofrecerlos–, pero al mismo tiempo ningún higo es igual respecto de los otros. Si comparáramos algunas características entre ellos, no importa cuáles sean, nos daríamos cuenta que difieren en muchas cosas, tal vez en todas.

Bien, la esencia de la evolución es justo esta variación individual, que aparece generación tras generación (sea pequeña o grande) cada vez que un individuo se reproduce. Esto es algo que siempre ha estado frente a nosotros y, sin embargo, no deja de ser maravilloso descubrir que la variación es el reflejo de la evolución y si la primera no existiera, tampoco la segunda.

Veámoslo de otra manera. Remontémonos al origen de la vida. ¿Qué sabemos de ese comienzo? Entre muchas cosas, que en ese momento las especies que existían eran realmente muy pocas comparadas con las actuales. Lo que eso significa es que a partir de un ancestro común, que ha ido cambiando (variando), se ha originado toda la diversidad biológica y cultural que conocemos. Entender esto tiene implicaciones diversas. Nada más para resaltar dos, podemos comenzar diciendo que quien entiende evolución de esta manera –y lo decimos así porque la teoría ha sido y sigue siendo constantemente distorsionada–, reconoce perfectamente la importancia de la diversidad y, por ello, la respeta. Ello le permite reflexionar constantemente sobre las implicaciones de aplastar a otros por el hecho de ser distintos.

¡Qué interesante idea!, ser parecidos en algo y, simultáneamente, distintos a todo. Se podrán dar cuenta que, por las mismas ideas que hemos desarrollado, re-

sulta completamente absurda la presuntuosa intención de estandarizarnos a todos mediante la aplicación de pruebas de evaluación. ¿Cómo homogenizar lo que por naturaleza es tan poderosamente distinto? Los que promueven dichos exámenes no comprenden la esencia de las ideas evolutivas que, paradójicamente, son muy sencillas y ampliamente aceptadas por la ciencia moderna.

No sabemos qué opinen los lectores, pero nosotros sostenemos que la evolución es un tema cultural de primer orden. Por eso es importante difundirlo. Es tanto lo que hemos aprendido de nosotros y de los demás, a través del estudio histórico de la vida, que nos gustaría apostar a que su descubrimiento temprano en otros ayudaría a que la sociedad fuera mucho más responsable con el entorno. Con esto cerramos esta parte del capítulo y nos sumamos a una frase, expresada por otros autores en revistas de ecología y evolución y que nos parece muy afortunada: ¡Viva la diferencia!

SOBRE LAS BOLAS DE CRISTAL Y OTROS ORÁCULOS

Nos resta comentar algo que ha sido un tema importante para muchos autores y tiene que ver con las siguientes preguntas: ¿cuál es el origen de la variación?, ¿cómo surge? Los mecanismos son múltiples y van desde la mutación y la recombinación genética de los organismos, que se reproducen sexualmente, hasta la regulación diferencial de distintos grupos de genes. Por nuestra parte, pensamos que eso no es lo más importante para poder expresar con claridad la esencia de la evolución. Y no es que carezca de importancia entender los mecanismos biológicos que están detrás de la variación –que se han ido descubriendo poco a poco– sino que cualquiera que esté interesados en ellos podrá descubrirlos en varios libros. Por lo tanto, más que repetir lo que otros ya han dicho muy bien, preferimos no perdernos en los mecanismos sino hacer hincapié en la importancia múltiple de la variación, y que se comprenda cuál es su relación con el tiempo y con el espacio que, finalmente, es en donde ocurre y transcurre la evolución.

Pensamos que la mejor forma de mostrar lo que queremos es regresando al ejemplo de los higos. Discutiendo, entre los autores de este capítulo, acerca de cuál sería el mejor higo, nos dimos cuenta muy bien que nos costó trabajo ponernos de acuerdo. Tuvimos que regresar dos días consecutivos al mercado y probar muchísimos. Aún así, seguíamos discrepando. Lo que para uno era importante, no lo fue tanto para el otro. Y eso, ¿qué significa?, ¿por qué nos lo cuentan?, se estarán preguntando muchos. Pues por una razón muy sencilla, porque resulta que la variación y su importancia siempre dependen de un contexto. Por tal motivo, en alguno de los ambientes, de los muchos posibles, lo que somos nos puede favorecer pero, en cambio, en otros lugares o circunstancias, esas mismas características producirían un efecto contrario.

Por otra parte, pero siguiendo con el mismo ejemplo, resulta que si además de escoger diferentes características en los higos, hubiéramos decidido propagar esas características, lo que se vería a través del tiempo serían los efectos de nuestras decisiones que, como ya dijimos, son distintas. Es decir, la promoción de la

divergencia y la diversificación de los higos. Pues si ahora utilizamos el mismo ejemplo como una metáfora de la evolución, resulta que la divergencia propiciada por nuestros gustos, es análoga a lo que le ocurriría a una especie en dos (o más) ambientes distintos. Por lo mismo, en el estudio de la evolución no tiene ningún sentido hablar de que un organismo es mejor que otro, o superior, o más evolucionado, pues como hemos explicado, todos son *contexto dependientes* (dependientes del contexto).

Comprendiendo el proceso evolutivo de esta forma tan dinámica, en donde la variación no tiene absolutamente ningún significado *a priori*, pues ocurre simultáneamente en distintos espacios y a través del tiempo, podemos acercarnos a una de las ideas filosóficamente más inquietante de la teoría evolutiva, la del azar. Con ello también podremos desterrar una de las ideas más arraigadas en el imaginario popular, la de que las especies pueden dirigir sus cambios para adaptarse. No hay nada más falso que eso y demostrarlo es más o menos sencillo.

Por un lado, si las especies tuvieran la oportunidad de dirigir su adaptación, entonces sería imposible explicar por qué se extinguen. Por el otro, y esto es algo muy importante de decir, resulta que las probabilidades de desaparecer también son contexto dependientes. Por ejemplo, una variación o cambio en la forma de los eritrocitos (a través de los que se transporta el oxígeno), conocida como anemia falciforme, en la mayoría de los países va en contra de la supervivencia de los individuos. En México sería fatal. Sin embargo, ese mismo cambio en la forma de los eritrocitos resulta ser sumamente ventajoso en los países en donde hay malaria, pues reduce las posibilidades de que el protozooario que la produce complete su ciclo de vida, lo que resultaría ser mortal. Por lo tanto, mientras que en un país una variante puede ser desventajosa –y ser llamada enfermedad–, en otro contexto produce los efectos contrarios. Por eso lo que los médicos describen como enfermedades, para nosotros son sencillamente el resultado de variantes.

No sabemos si el amable lector ya se haya dado cuenta pero, a pesar de la incertidumbre que la siguiente afirmación pueda provocar, queremos decir que el azar es tan fuerte durante el proceso evolutivo, que no se puede predecir. El que lo haga miente. Por eso nuestro trabajo es parecido al del historiador y puede que hasta algunas de las herramientas de estudio sean las mismas. Lo que hacemos, en todo caso, es intentar desentrañar el pasado para entender el presente, nunca el futuro lejano.

DOS EJEMPLOS EN DONDE SE FUNDE LA EVOLUCIÓN BIOLÓGICA CON LA CULTURAL

La producción de los alimentos, la forma de prepararlos y los rituales que hay alrededor de ellos son tema de análisis de la evolución biológica y cultural. No podemos dejar de mencionarlos porque nos apasionan. La producción de flores y la selección sexual en humanos también nos maravilla, y en este caso los hemos escogido como ejemplos para desarrollarlos brevemente.



(a) Planta silvestre

(b) Planta cultivada

Figura 1: Imágenes de plantas de cempasúchil.

Quien haya estado cerca de la zona arqueológica de Xochicalco en el estado de Morelos, en los meses de octubre y noviembre, tal vez sepa de lo que hablaremos. Claro, eso siempre y cuando se haya fijado en el siguiente detalle. Justamente en esos meses, cuando la mayoría de las plantas y, sobre todo, los árboles ya han perdido sus hojas y el paisaje cambia por completo, sucede algo increíble: los campos al ras del suelo se vuelven multicolor. La razón es que muchas yerbas comienzan a florecer. Entre ellas, queremos llamar la atención sobre una planta. Como se puede ver en la figura 1, en el lado izquierdo, la característica más llamativa de esta pequeña planta es el color de sus flores. Son completamente doradas. Los campos se llenan de este color. Si caminan lo suficiente entre ellos y los exploran, se podrán dar cuenta de que, además de las flores doradas, entre las mismas plantas hay algunas, menos numerosas, que producen flores de un amarillo menos intenso.

Si se acercan a ambos tipos de plantas, todavía un poco más (y trascienden la contemplación que seguramente los tiene absortos), se podrán dar cuenta de otras dos cosas más. Primero que nada, que sus tallos y sus hojas son muy similares. Ahora, si son un poco más curiosos y toman un pedacito de hoja y la huelen, entonces podrán distinguir de qué planta hablamos. Háganlo algún día y comprobarán lo mismo que nosotros, que se trata de la flor que utilizamos los mexicanos en las ofrendas de las celebraciones de los días de muertos.

Sí, han adivinado, ¡es la flor de cempasúchil! La razón para haber colocado dos imágenes en la figura 1 es que, a simple vista, la imagen de la izquierda no se parece demasiado a la del lado derecho, que es la que compramos en los mercados. Y no se parecen mucho porque la flor de la izquierda es la planta silvestre de la que descienden todas las variedades que hoy utilizamos (que en el pasado eran menos). Para comprobarlo, tan solo hay que tomar un pedazo de hoja de ambos

tipos de plantas y, al hacerlo, comprobar que huelen igual. Es justamente en este punto donde se puede ver, con toda claridad, cómo ha influido la cultura sobre la evolución de muchos rasgos biológicos en diversos grupos silvestres.

El caso del cempasúchil es uno de ellos. Por ejemplo, sin la cuidada elección continua de características que nos atraen, por múltiples motivos (dentro de los cuales los estéticos son muy importantes), jamás hubiéramos visto la inmensa variedad de tipos de flores de cempasúchil que se venden en los mercados de toda la República Mexicana. En la naturaleza, su evolución floral ha sido distinta y más lenta. Al menos eso es lo que se puede ver, a simple vista, cuando se recorren los campos floridos del estado de Morelos en día de muertos.

Pensamos que este sencillo ejemplo es un buen resumen de una larga y bella historia en donde se funden la biología y la cultura: la historia de la crianza de las plantas y de los animales que aprovechamos alrededor del mundo. Dicho de otra manera, lo que hacemos es utilizar muchas características naturales y modificarlas en cientos de direcciones sociales.

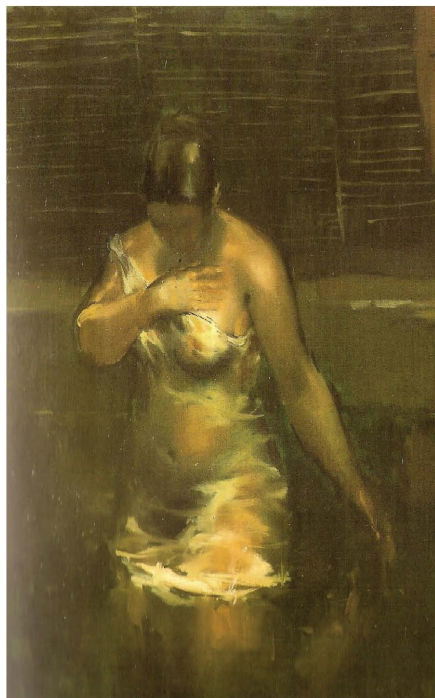
En el caso de las plantas de cempasúchil, la divergencia de tipos florales se puede explicar retomando el ejemplo de los higos. Al igual que los autores elegimos distintas características en los higos para ser comprados, los productores de flores hacen lo mismo. Seleccionan ciertas características que, además, son distintas entre los diferentes agricultores y, posteriormente, cada quién va propagando una característica en particular.

A través del tiempo, lo que vemos parecería ser pura magia, cosas que se parecen pero que a la vez son distintas. Y aunque los límites de los que hablamos al inicio de este capítulo siempre están presentes, y son muchos, con la variación ocurre lo mismo, siempre surge. Si fuera de otro modo, no tendríamos de dónde escoger y, por lo tanto, la inmensa variedad de especies de un mismo tipo que producimos no podría explicarse. Ahora, démosle paso al otro ejemplo.

Para ello es necesario trasladarnos a la calle de Álvaro Obregón, de la colonia Roma en la Ciudad de México, y recorrer la calle de un extremo a otro. Si lo hacen sobre el camellón de en medio se encontrarán con las esculturas de Ponzanelli. Fíjense en las esculturas de mujeres. Ahora recuerden alguno de los cuadros de Rembrandt, ¿qué tal el de las tres gracias? o cualquier otro (ver figura 2, del lado izquierdo). ¿Se dieron cuenta?, hay un parecido inmenso en cuanto a la forma del cuerpo de estas mujeres. Todas son hermosas y robustas, siguen la estética de cierta época, reflejan un gusto particular. Ahora, pregúntenle a un adolescente qué piensa de los cuerpos.

Nosotros lo hicimos y la mayoría consideró a esas mujeres con “sobrepeso” y no les agradaba. ¿Qué tal si ahora voltean y ven los anuncios espectaculares de ropa íntima o de moda? Como se darán cuenta, todas las modelos son radicalmente distintas a las que posaron para los cuadros y las esculturas. Al contrario de las primeras, son mujeres muy delgadas. Aún sin medirlas, nos podemos dar cuenta de estas diferencias.

Entonces, si los cambios culturales, que ocurren en una sociedad entre generaciones –como los que acabamos de narrar–, pueden modificar los patrones de



(a) Imagen de un cuadro de Rembrandt.



(b) Modelo *fitness*. Fotografía tomada por Glenn Francis, de www.PacificProDigital.com, en el acervo de [wikimedia commons](https://commons.wikimedia.org/).

Figura 2: La estética de cada época.

conducta (en este caso, por ejemplo, sobre la manera en que se elige una posible pareja), también pueden llegar a ser lo suficientemente importantes como para modificar distintos aspectos de nuestra propia biología.

De manera análoga a los efectos de la publicidad o la televisión, muchos otros desarrollos tecnológicos –todos productos culturales– tienen una influencia muy grande sobre nuestra propia evolución como especie. De tal forma que, así como los cuerpos han cambiado y lo seguirán haciendo a través de la historia, también lo ha hecho la esperanza de vida, la emergencia de ciertas enfermedades, la tasa de mortalidad infantil y otras características de historia de vida de las personas. Es así, mediante estas pequeñas historias, que se repiten por todo el mundo, que los seres humanos no solamente somos capaces de influir sobre la evolución de otras especies, sino también sobre la nuestra.

CIERTAMENTE «LOS VIAJES ILUSTRAN»

Nos despedimos como comenzamos, reafirmando la importancia de los viajes. Sobre todo para alguien que se dedica al estudio de la evolución, una travesía pueda tener, incluso, un significado filosófico muy amplio. La teoría de Wallace y de Darwin es un buen ejemplo de ello, pues ésta se construyó en esas circunstancias y en ellas tomó forma.

También sentimos que el azar nos benefició ampliamente en ese sentido. Déjenos explicarles. Resulta que cuando amablemente nos invitaron a escribir este capítulo estábamos en vísperas de salir de México rumbo a Barcelona. El viaje nos permitió concentrarnos en las comparaciones y atestiguar la diversidad con otros ojos, con los ojos del viajero, con los ojos del naturalista filósofo. Así, este capítulo fue escrito entre un país y otro que, por paradójico que parezca, se parecen mucho a lo que hemos narrado a lo largo de este capítulo. Por un lado encontramos muchas semejanzas entre ambos países (el idioma es el mismo). Pero, al mismo tiempo, las diferencias también fueron enormes (incluso en el idioma pueden verse y oírse). A pesar de hablar esencialmente el mismo idioma, el tono, la pronunciación y el significado de muchas palabras son completamente distintas: tanto, que de sólo escucharnos inferimos que somos de países distintos. Sin embargo, eso no nos impidió reconocer a alguien más como otro ser humano.

Finalmente, nos gustaría que este capítulo, que proponemos como un ensayo, sirva como el reflejo de un espejo: para identificar en nosotros algo de todos los seres y, a su vez, en ellos algo de nosotros –y también mucho, pero mucho, de nosotros solamente en nosotros–. Entonces, no nos queda más que invitar a los lectores a seguir compartiendo con nosotros parte de la curiosidad que nos incita nuestra propia existencia y que se ha convertido en todo un reto y en un campo de estudio con interrogantes infinitas.

BIBLIOGRAFÍA

- Burkhardt Jr., R. W. 1984. "The zoological philosophy of J. B. Lamarck". En Lamarck, J. B. (ed.), *Zoological Philosophy. An exposition with regard to the natural history of animals*. The University of Chicago Press.
- De-Waal, F. 2007. *Primates y filósofos: la evolución de la moral del simio al hombre*. Paidós Ibérica editores.
- Margulis, L. 2003. *Una revolución en la evolución: Escritos seleccionados*. Universitat de València.
- Maynard Smith, J. y E. Szathmáry. 2001. *Ocho hitos de la evolución. Del origen de la vida a la aparición del lenguaje*. Tusquets editores.

⊙ *Esta es una página en blanco.* ⊙

PANARQUÍA EN ZANBATHA: UNA HISTORIA DE LOS CICLOS ADAPTATIVOS EN EL VALLE DE LA LUNA

Geraldine Ann Patrick-Encina*

La crisis ambiental (crisis global y planetaria), no podrá darse sólo por la vía de una gestión racional de la naturaleza y del riesgo del cambio global. La crisis ambiental nos lleva a interrogar al conocimiento del mundo, a cuestionar este proyecto epistemológico que ha buscado la unidad, la uniformidad y la homogeneidad; a este proyecto que anuncia un futuro común, negando el límite, el tiempo, la historia, la diferencia, la diversidad, la otredad.

Enrique Leff, *La complejidad ambiental*.

* * *

REFLEXIONES como la de Leff, en el epígrafe, han llevado a diversos investigadores a plantearse la importancia de considerar el contexto ecológico y humano en toda su complejidad para, desde ahí, repensar el bienestar tanto de los ecosistemas como de las distintas sociedades y culturas.

Hace más de dos décadas un grupo de investigadores de ciencias sociales, económicas, biológicas y matemáticas, coordinados por C. S. Holling y Lance Gunderson, conformó la Resilience Alliance.¹ A lo largo de cinco temporadas, en misma cantidad de años, participaron en talleres intensivos con la meta de desarrollar y someter a prueba los elementos de una teoría integradora que tuviera el grado de simplicidad necesario para el entendimiento, pero también la complejidad requerida para desarrollar políticas para la sustentabilidad. Porque Holling argumentaba que se carecía de una teoría integradora que sirviera como cimiento para diseñar futuros sustentables: una teoría que reconociera las sinergias y los estreñimientos de las interacciones entre la naturaleza, las actividades económicas y las personas.

El conjunto de criterios que rigió la investigación fue:

- La teoría debe ser “lo más simple posible, pero no más simple” de lo que se necesita para el entendimiento y la comunicación.

* Fellow, Center for Earth Ethics, Union Theological Seminary - Columbia University. / gpatrick@uts.columbia.edu

¹ Para mayor información acerca de Resilience Alliance consultar la página de internet en www.realliance.org/reports/ y buscar el documento *Final Report to the MacArthur Foundation*.

- Debe ser dinámica y prescriptiva, no estática ni descriptiva. El monitoreo del presente y del pasado es estático si no se conecta con políticas y acciones ni con la evaluación de diferentes futuros.
- Debe abarcar la incertidumbre y lo impredecible. Las sorpresas y el cambio estructural son inevitables en los sistemas de la gente y de la naturaleza.

¿QUÉ ES LA PANARQUÍA?

Los investigadores de la Resilience Alliance crearon el término *panarquía* para describir la naturaleza evolutiva de los sistemas complejos que se adaptan. El término encapsula la explicación de cómo la novedad y el cambio coexisten en un contexto de persistencia y estabilidad. Según C. S. Holling,

Definimos panarquía como la estructura en que sistemas de la naturaleza (p. ej. bosques, pastizales, lagos, ríos y mares), de seres humanos (p. ej. sistemas de gobernanza, tribus y culturas) así como sistemas combinados humano-naturaleza (p. ej. agencias que controlan el uso de recursos naturales), están interconectados en ciclos adaptativos interminables de crecimiento, acumulación, colapso, reestructuración y renovación.

Un sistema panárquico es un sistema con subconjuntos de sistemas anidados, ordenados en una cierta disposición. Cada subsistema presenta un ciclo adaptativo, por lo que en un determinado momento podemos estar apreciando, por ejemplo, tres subsistemas con diferentes velocidades de desenvolvimiento en sus ciclos y en diferentes fases.

CICLOS ADAPTATIVOS DE LOS SISTEMAS ANIDADOS

Dice Holling que los ciclos adaptativos rápidos inventan, experimentan y someten a prueba. Los ciclos adaptativos lentos estabilizan, conservan la memoria acumulada de experimentos pasados que fueron exitosos y con los que el sistema puede sobrevivir en el futuro. En un sistema sano, cada nivel escalar puede operar a su propio ritmo, protegido por las escalas mayores y lentas, a la vez que vigorizadas por los ciclos rápidos, innovadores y a menor escala espacial. La panarquía completa es, por ende, creativa a la vez que conservadora. Las interacciones entre los ciclos y escalas en una panarquía combinan el aprendizaje con la continuidad.

Las variables que se consideran en el ciclo adaptativo de los sistemas complejos son:

1. El potencial para un cambio;
2. La conectividad entre elementos y procesos constitutivos; y
3. La resiliencia o capacidad de un sistema para absorber cierto impacto externo o interno.

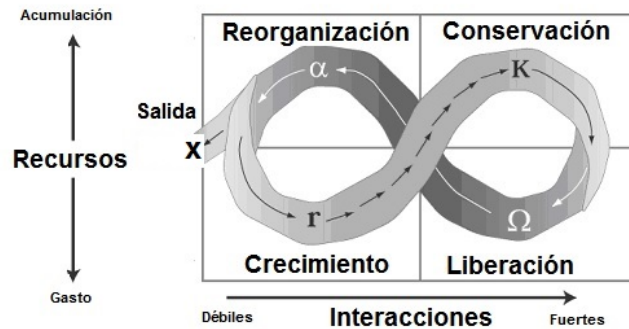


Figura 1: Ciclo adaptativo (con base en el original de Gunderson y Holling).

La gráfica del ciclo adaptativo en la figura 1 sólo muestra dos fuerzas (el potencial para el cambio y la conectividad).

El potencial para el cambio puede manifestarse en ambientes ecosistémicos, sociales y económicos. En el caso de un ecosistema el potencial de cambio puede representarse mediante el potencial productivo (proveído por la cantidad de biomasa, la estructura física y los nutrientes acumulados como consecuencia de sucesiones ecológicas). En un sistema social, el potencial puede ser representado por el tipo de redes de relaciones (de amistad, de respeto mutuo y de confianza entre las personas del mismo grupo o entre éstas y las instituciones de gobierno). A este potencial Westley y sus colaboradores lo denominan *capital cultural*. En economía, el potencial puede representarse como el potencial disponible gracias al cúmulo de conocimiento aplicable en la transformación de materias primas y el desarrollo de tecnologías para incrementar la productividad al menor costo.

Por otra parte, la conectividad se refiere a la fuerza vinculante entre los elementos y procesos inherentes de un sistema, o el grado de control que éste ejerce sobre la variabilidad externa.

La resiliencia en los ecosistemas es la magnitud de perturbación que puede ser absorbida por los ecosistemas antes de que cambie su estructura (o dominio de estabilidad). La estructura cambia cuando se han alterado las variables y los procesos que controlaban el comportamiento del sistema. El ecosistema atraviesa un umbral y pasa de un estado o dominio de estabilidad a otro dominio. Por lo tanto, la resiliencia depende de que existan múltiples dominios de estabilidad, como sucede en los sistemas complejos adaptativos.

LAS FASES DE LOS CICLOS ADAPTATIVOS

Los ciclos adaptativos de los sistemas que se anidan en la panarquía constan de una serie de fases sucesivas que están representadas en la figura 1, y que, en términos

generales, pueden denominarse de la manera siguiente:

- Fase de crecimiento (fase r),
- Fase de madurez (fase K),
- Fase de colapso (fase Ω , que se lee *omega*), y
- Fase de reorganización (fase α , que se lee *alfa*).

En la fase de crecimiento (fase r) el potencial para el cambio es incierto al principio, pero a medida que la conectividad va incrementándose, el potencial para el cambio se acelera. En esta fase la resiliencia es alta, y se observa una gran actividad de uso y aprovechamiento de los elementos y atributos del sistema, en donde fluye información,² energía y materiales, y todos los agentes se benefician en estas interacciones.

En la fase de madurez (fase K) el potencial para el cambio y la oportunidad para nuevas interacciones se desaceleran. Los nodos de las redes se han saturado y comienzan a acumularse las materias, la energía, la información, así como las vías y los mecanismos para que éstos fluyan. En los bosques, por ejemplo, se acumula biomasa en demasía. La resiliencia fue alta al principio de la fase de madurez, pero cuando se alcanza el punto máximo de acumulación de energía, materia e información, llega un momento en que la resiliencia se reduce al mínimo. En este momento, resulta imposible controlar cualquier perturbación (una chispa, o un rayo en el bosque), por lo que se desata una crisis (fase Ω), la cual constituye una válvula de escape para el sistema.

En aquel momento se libera materia, energía e información, lo cual es benéfico para el sistema, porque si trascienden las *cápsulas de memoria* o el factor recordatorio del sistema (en forma de semillas, raíces, yemas axilares, nidos –en el caso del bosque–), se ingresa exitosamente a una fase de reorganización (fase α), donde prevalecen la renovación y la innovación.

En esa fase de reorganización (alfa) el potencial para el cambio va dándose lentamente a costa de ensayos de prueba y error. La conectividad es baja porque el reconocimiento entre los componentes para identificar las ventajas de interacción mutua es lento. La resiliencia se incrementa a medida que se ingresa a la fase de crecimiento (fase r). Así, el sistema ha recorrido un ciclo adaptativo y está listo para ingresar a un nuevo ciclo.

Si, por el contrario, el factor recordatorio no trasciende, o si durante esta fase de reconfiguración o reorganización intervienen nuevos elementos y procesos “revolucionarios”, la identidad del sistema cambia radicalmente, ingresando a un ciclo

² Redman y Kinzig arguyen que la información es clave entre los distintos ciclos adaptativos de un sistema panárquico. Muestran que la forma en que se envían señales entre los componentes de un sistema y otro es distinta. En el caso de los ecosistemas, la nueva información puede crearse en escalas grandes y ser transmitida en escalas temporales propias del ecosistema, mismo que puede responder al cambio en forma inmediata o muy lentamente. Por otro lado, las sociedades humanas pueden no estar respondiendo a un contexto ambiental real (como la desaparición de cierto elemento o proceso clave), sino estar reaccionando a un contexto construido con anterioridad, que forma parte de la tradición y que ha sido recordado.

llamado “*x*” en la figura 1. Los procesos que distorsionan la evolución normal del sistema pueden ser naturales, pero desde la revolución industrial se han debido principalmente a efectos antropogénicos.

¿LA *figura en forma de ocho* SE DA SIEMPRE?

Brian Walker y Nick Abel han mostrado que hay algunos sistemas (como los de pastoreo) en los cuales no es posible replicar la *figura en forma de ocho* del modelo de Holling (en la figura 1). Por lo tanto, optan por emplear las cuatro fases del modelo del ciclo adaptativo sin hacer referencia explícita a los ejes de las variables. En cada fase toman en cuenta principalmente la variable de resiliencia. Así, hacen notar que en la fase de crecimiento (fase *r*) y en la de madurez (fase *K*), hay máxima resiliencia. Hacia el final de la fase de madurez la resiliencia cae, para entrar en la fase de colapso (fase Ω); si bien entre esta última y la de reorganización (fase α) la resiliencia es baja, ésta comienza a incrementarse y se vuelve relativamente alta en la fase de crecimiento (fase *r*). Los mismos autores argumentan que, para muchos estudios, la resiliencia se debe evaluar para cada sistema en forma separada. Walker y Abel, apuntan:

La noción de una resiliencia general –es decir, en que los ecosistemas sean resilientes frente a cualquiera y cada una de las perturbaciones para una multiplicidad de propósitos (producción, diversidad de especies, valor estético y otros)– no se puede asimilar, y pretender hacerlo sólo nubla el entendimiento.

Es decir, cuando vemos un ecosistema como un sistema complejo con múltiples subsistemas anidados unos en otros, debemos cuidar describir las particularidades de cada subsistema. Me refiero a las respectivas estructuras y funciones y a cómo los subsistemas generan procesos de interacción con otros mientras transitan por cada una de las fases de sus respectivos ciclos adaptativos. Explicar esto requiere del acercamiento de investigadores que sean capaces de enfocarse en los atributos específicos y claves del subsistema, pero también que observen, en distintas escalas espacio-temporales, las dinámicas de los flujos de energía, información y materia, así como las formas de incidir en el conjunto mayor de subsistemas. Todo ello para determinar, fundamentalmente, la resiliencia de cada subsistema, porque el comportamiento del sistema en su conjunto, ante un factor ajeno y desconocido, dependerá de la fase en que se encuentre cada subsistema (fase *r*, fase *K*, fase Ω o fase α).

LOS HUMANOS, CREADORES DE REALIDADES VIRTUALES

Cuando algunos de los subsistemas anidados en el sistema complejo (es decir, en el ecosistema) consisten en grupos humanos, el ecosistema se complejiza aún más, en particular porque se hace necesario contemplar ciertos principios. Se trata de principios que mantienen una alta resiliencia tanto en el subsistema *comunidad natural* como en el subsistema *comunidad humana*. Tales principios se gestan al interior de la comunidad humana, y tienen que ver con su capacidad para dar sentido y

significación a los elementos en su entorno. Esta capacidad es tan poderosa que la tercera variable a tener en cuenta, para explicar las estructuras de las dinámicas sociales (aparte del tiempo y el espacio), es la variable de las significaciones.³ Esta habilidad de los sistemas sociales para crear estructuras de significación o *realidades virtuales* es clave para comprender la resiliencia en los sistemas sociales. En este sentido, Charles Redman y Ann Kinzig se refieren a la relación implícita entre la resiliencia de una sociedad y lo que ellos denominan conocimiento:

Los sistemas humanos crean y transmiten a las generaciones subsiguientes una cultura, la cual incluye símbolos, significados y comportamientos acerca de las formas tradicionales de hacer las cosas. Las formas sociales que denominamos sociedades se mantienen intactas a través del proceso de compartir esta información mediante la socialización, las sanciones y las comunicaciones directas, así como a través de ceremonias, mitos e iconografía. Así, las formas en que una sociedad filtra y transmite conocimiento a una variedad de niveles de organización es en sí un elemento esencial en la resiliencia de esa sociedad.

VIVIMOS EN UNA PARADOJA: QUEREMOS CAMBIAR, PERO NO TANTO

En los sistemas complejos adaptativos, la paradoja más importante para Holling es que, si bien el cambio es esencial (porque se introducen innovaciones y creaciones que liberan o consumen parte de la energía acumulada en el sistema), la estabilidad es necesaria, y esta paradoja es clave para forjar futuros sustentables. Apunta Holling:

Sustentabilidad es la capacidad para crear, poner a prueba y mantener la capacidad adaptativa. Desarrollo es el proceso de creación, puesta a prueba y mantenimiento de oportunidad. La frase que combina los dos términos –desarrollo sustentable– se refiere por lo tanto a la meta de forjar capacidades adaptativas y de crear oportunidades. Por ende no es un oxímoron, pero representa una combinación lógica.

Durante la fase de estabilidad podemos involucrarnos en procesos para crear, poner a prueba, aceptar que nos hemos equivocado, y volver a intentarlo desde otros enfoques, con nuevos conocimientos y contribuciones. Por otro lado, cuando las condiciones son altamente inestables nos aferramos a lo conocido y nos da miedo explorar nuestras potencialidades y rebasar los límites del ámbito de confort. El miedo produce estasis y anquilosamiento, de modo que nosotros, como sistema, podemos llegar a ingresar a esa caja negra llamada fase *x* en la figura 1. Para evitarlo, debemos concebirnos como un sistema en la panarquía; uno que es dinámico,

³ Cabe resaltar que así lo anota el sociólogo Frances Westley, a partir del trabajo de Anthony Giddens, para explicar por qué los sistemas de personas y de naturaleza no son simplemente sistemas socioecológicos. Por su parte, autores como James K. Kay, o Fikret Berkes e Iain Davidson-Hunt, plantean el uso del concepto ecosistema desde la Nueva Ecología, donde el ecosistema puede anidar comunidades humanas. Considero que siempre y cuando se agregue la variable de las significaciones que una cultura crea y recrea en su interacción con la naturaleza, sí se puede aplicar el concepto de socioecosistema, y también el de ecosistema a la manera de Kay, o Berkes y Davidson-Hunt. Pero definitivamente, la discusión está abierta.

creativo, dispuesto al cambio y la innovación, respetando formas que las historias de las coevoluciones han demostrado ser altamente resilientes y trascendentes.

¿POR QUÉ NO SE HA COLAPSADO EL MUNDO?

El principal descubrimiento acerca del ciclo adaptativo es que existe sólo un *puñado* de elementos y procesos claves que controlan los cambios de los sistemas complejos. Lance H. Gunderson y Holling sugieren que la complejidad de los sistemas vivos de personas y naturaleza gira en torno a un pequeño número de procesos controladores, y no de una asociación azarosa de factores. Holling se fundamenta en Simon Levin para explicar este fenómeno:

Es característico de los sistemas complejos que se adaptan, la individualidad de los componentes, las interacciones puntuales entre los componentes, y un proceso autónomo que utiliza los resultados de esas interacciones puntuales para seleccionar un subconjunto de esos componentes para su auto-refuerzo.

Holling explica que los ciclos de transformación (o ciclos adaptativos) ocurren a escalas de distinto tamaño, uno anidado dentro del otro. En la dimensión espacial, las escalas pueden ser desde una hoja hasta la biósfera; en la dimensión temporal, desde días hasta épocas geológicas. Al comprender estos ciclos y sus escalas, parece posible identificar puntos en que el sistema es capaz de aceptar un cambio positivo y de usar esos puntos de torque para forjar resiliencia y sustentabilidad.

Esos puntos de torque son cápsulas de información que, llegado el momento, se despliegan y contribuyen al resurgimiento de atributos estructurales y funcionales útiles para que el sistema se reconfigure con su identidad original. Esto nos aproxima a una solución a la paradoja de cómo aún existen los ecosistemas a pesar de que en los últimos milenios han habido sucesos sociales con repercusiones devastadoras sobre éstos. En efecto, los ecosistemas, la humanidad y el mundo no se han colapsado. Los sistemas ecológicos tienen la resiliencia para experimentar cambios significativos y aún así, mantener la integridad de su funcionamiento. Además, los humanos asumen un comportamiento no de persistencia pasiva, sino de creatividad e innovación cuando se alcanzan ciertos límites (al menos, los humanos con una visión de mundo construida a partir de una ética por la vida).

CONFABULACIONES PARA EL COLAPSO

Para que un sistema llegue a un fin definitivo, deben haber coincidido varios sucesos que, desde diferentes escalas de tiempo y espacio, influyeron persistentemente sobre los mismos elementos clave de dicho sistema.

Como lo han apuntado Joan Martínez Alier y Jordi Roca Jusmet, desde la revolución industrial, instituciones y organizaciones (en su mayoría de corte occidental) han operado a escalas homogéneas y mucho más rápidas que las de la naturaleza, que no miden las consecuencias a escalas temporales y espaciales mayores a un par de generaciones. Su fin último es la acumulación de capital y de poder, para lo cual aplican formas de manejo extremas de los *recursos* renovables

y no renovables. Con ello favorecen la sobre-explotación, la sobresaturación de los sistemas con contaminantes,⁴ y la degradación estética del paisaje. Todos estos elementos son lo que los economistas ecológicos llaman *externalidades* del sistema de producción, las cuales no son incluidas en las ecuaciones de ganancias. Es entonces cuando aumenta la probabilidad de que se produzcan cambios extremos en los ecosistemas a tal grado que se desvíen de su curso o proceso natural evolutivo.

Los resultados de tales manejos representan *accidentes congelados* cuyos efectos pueden *deformar* el futuro de la historia de los sistemas durante largos periodos –explican D. Ludwig y colaboradores (citados por Gunderson y Holling). Hay estados irreversibles y también estados lentamente reversibles. Para el segundo caso, una vez que el sistema se ha transformado, éste puede regresar a su estado de autosustentabilidad bajo dos condiciones: (i) que exista una cooperación humana guiada por una estrategia de manejo explícita y concienzuda, la cual esté basada en una estructura de significaciones apropiada culturalmente y que además sea congruente con el propósito establecido; y (ii) que se tenga presente que aun con toda la voluntad y el esfuerzo transdisciplinar, no hay garantía de que la recuperación se dé en un tiempo generacional humano, por lo que se debe heredar a las siguientes generaciones un velero de esperanza y un mar de paciencia.

¿DÓNDE ESTÁ ZANBATHA?

Según Beatriz Albores, el valle de Toluca consiste en tres zonas: la primera es la zona norteña o serrana, cuya elevación más característica es el volcán Jocotitlán (*Nguémoru*⁵) y donde se yerguen serranías en las que se emplazaron cabeceras antiguas como Mazahuacán, Xocotitlán, Ixtlahuaca (famosa por El Cerrito, muy importante en la historia y la cosmovisión otomiana) y Xiquipilco. Esta zona, de clima templado, es significativa por el maguey (y sus derivados, el ixtle y el pulque) y por el bosque de pino y ocote (del cual emerge la divinidad Ocoteuctli).

La segunda es la zona central del valle de Toluca, que se caracteriza por el complejo Nevado de Toluca-Laguna de Lerma-Sierra de las Cruces. Las elevaciones albergan bosques de pino-encino y fauna de gran envergadura (puma, jaguar, venado cola blanca) así como de tamaños medianos y pequeños (zorrillo, armadillo, tejón, tuza, varios ratones y murciélagos, así como muchas aves). La amplia llanura aluvial, a una altitud promedio de 2,350 msnm, se localiza entre las faldas del Nevado o Chicnauhtecatl y las faldas de la Sierra de las Cruces. Esta planicie, extendida sobre un grueso manto rocoso de gran porosidad (el acuífero Toluca-Ixtlahuaca), contuvo un depósito lacustre relativamente somero (de máximo 4 m de profundidad) que alcanzó, en su tiempo de esplendor (entre 8,000 a.n.e. y 1500 n.e.), cerca de 40 mil hectáreas, así como vegetación y fauna sumamente diversas.

Zanbatha es el nombre que los matlatzincas dieron a la extensa zona humedal de la cual nació el río que se nombró Dathe y, muy recientemente, Lerma (por el

⁴ Algo que Martínez Alier y Roca Jusmet denominan “*stock* de sustancia acumulada”.

⁵ *Nguémoru* es palabra mazahua, y es el nombre de una gran deidad con advocaciones a la lluvia y al fuego.

conde duque de Lerma, España). Durante el Postclásico (1100-1480 n.e.) esta zona contuvo dos cabeceras principales, Tollocan y Matlatzinco (en Tecaxic). Ambos nombres, en náhuatl, fueron asignados por los tenochcas al momento de la incursión e invasión de Axayácatl.

La designación de *zona central* dada por Albores es lógica tanto por su ubicación en el paisaje como por la geografía lingüística, ya que aquí confluían los principales idiomas otomianos: el *jñatjo* (mazahua), el *y'u mhu*⁶ (otomí) y el *fo't'una* (matlatzinca). En la actualidad son veinte los municipios que comparten esta zona. Hacia el sur: San Mateo Texcalyacac, Joquicingo, Santa María Rayón; hacia el oriente, de sur a norte: Santiago Tianguistenco, Almoloya del Río, Santa Cruz Atizapán, Capulhuac, Ocoyoacac, Lerma, Xonacatlán, Oztolotepec, Temoaya; hacia el poniente, de sur a norte: Tenango del Valle, Calimaya, San Antonio la Isla, Chapultepec, Mexicaltzingo, Metepec, San Mateo Atenco y Toluca.

La zona sureña del valle de Toluca abarca las sierras escarpadas que dan inicio a la cuenca del río Balsas. Por el lado oriente emerge el volcán de Zempoala, desde el cual se extiende una zona de malpaís (el campo volcánico Chichinautzin) hacia el poniente. Los municipios en la porción inicial de la cuenca del Balsas son Ocuilan, Huitzilac y Taxco, así como Malinalco, Chalma, Tenancingo y Zumpahuacan. Al recorrer esta región se aprecian los bosques de pinos, oyameles y encinos, cubriendo las cumbres frías, mientras que hay árboles de menor altura (como madroños, tepozanes) y arbustos (jaras y escobilla) en los valles intermontanos descendientes. A medida que el clima se hace más cálido y húmedo (a altitudes de entre 1800 y 1200 msnm) la vegetación se vuelve exuberante, proliferando acacias, cícadras, jacarandas y árboles frutales como mangos, aguacates, papayas y zapotes, entre otros.

PANARQUÍA EN ZANBATHA

El sistema complejo en que me enfocaré es el socioecosistema de Zanbatha, al cual comprendo como una panarquía constituida por múltiples sistemas. Cada uno ha tenido una serie de ciclos adaptativos de distinta duración, a escalas espaciales diferentes y con estados de resiliencia particulares.

El sistema de mayor envergadura espacial y temporal es el ecosistema de humedal. En éste se anidan múltiples subsistemas, de los cuales me referiré únicamente a dos: (i) al que constituye una comunidad humana que configuró un modo de vida lacustre (el cual describiré adelante) a partir de la estructura de significaciones que desarrolló en una etapa temprana de asentamiento; y (ii) al que cons-

⁶ El vocablo *y'u mhu* ha sido recogido en Ixtenco, Tlaxcala, donde el hablante de otomí Agustín Ranchero Márquez, con más de cincuenta años de investigación autodidacta de la lengua materna, aclara que *hñahñu* es una tergiversación de *nhiñ y'u* que significa "el que habla en el camino", denominación usual entre los ancianos. Otro nombre que él ha verificado en Hidalgo, Querétaro, Estado de México (Temoaya) y Puebla (San Pablito) es el de *y'u mhu*, que significa "camino de Dios". Es éste el que él considera el primordial, por lo que, atendiendo a su incansable llamado en diversos foros sobre la necesidad de que se elimine aquella palabra "inventada por los lingüistas" y que se escriba y pronuncie correctamente la palabra original, aquí empleo siempre *y'u mhu*.

tituye otra comunidad humana que configuró un modo de vida capitalista en un tiempo muy reciente. Cada comunidad humana produjo una serie de instituciones o reglas para la interacción con su entorno.

HISTORIAS ANIDADAS EN HISTORIAS

Lo que interesa hacer notar al describir los ciclos adaptativos de los respectivos sistemas de la panarquía en Zanbatha es la resiliencia de esos sistemas dependiendo de la fase en la que se encuentran. Además, al entrar en interacción con las fases de los otros sistemas, cómo emergen situaciones que pueden gatillar cambios que desconfiguran o cambios que crean y construyen, dependiendo del grado de resiliencia que tenían en ese momento.

Comenzaré relatando, de manera muy concisa, la historia del ecosistema en sí, para lo cual recorreremos diez mil años, que en realidad son una pestañada en la historia geomorfológica e hidrológica del valle. Pero en un momento de esa historia, encontraremos el extremo de la madeja de otra historia, la de los grupos humanos con un incipiente modo de vida lacustre, que fue robusteciéndose paulatinamente, ciclo tras ciclo adaptativo. A medida que avancemos por los ciclos de este modo de vida lacustre (MVL),⁷ veremos que intercederán eventos que impactaron en distintos grados al MVL y también al ecosistema. Son repercusiones que cada sistema asimilará según la resiliencia de algunos de los subsistemas clave en ese momento. Estando en sus respectivas fases K , ambos sistemas serán víctimas de la estrategia de un sistema oportunista (el modo de vida capitalista) por aprovechar la cuantiosa agua disponible. Exploraremos las respuestas de los dos sistemas y determinaremos en qué fase se encuentran en la actualidad.

FASES QUE DURARON MILENIOS

Hace diez mil años, los glaciares que habían ocupado el Eje Neovolcánico Transversal comenzaron a retirarse. En el valle de Toluca quedaron al descubierto planicies aluviales con extensos espejos de agua formados gracias a los derretimientos y también por el efluvio de las aguas excedentes del acuífero subterráneo. Los mamuts ramoneaban en las orillas cenagosas, en donde iban proliferando comunidades de pastos, plantas acuáticas y subacuáticas, y más adentro, de juncos y tulares. A medida que transcurrían las temporadas invernales, llegaban más aves migratorias desde el norte, como patos, gansos migratorios, pelícanos, águilas, entre otras.

Aquella era la fase r de un nuevo ciclo, en el cual se estaban reorganizando los componentes, después de una prolongada fase de colapso (mientras había transcurrido la era glacial). La fase r duró unos dos mil años, en los cuales la resiliencia de cada uno de los principales subsistemas (como las comunidades de aves asociadas a las comunidades de tules y a los espejos de agua; los ojos de agua; los veneros; los

⁷ Es Beatriz Albores quien acuñó este nombre a partir del planteamiento de que "la inagotable fuente de alimentos fue la base para la conformación de un modo de vida, sustentado en actividades de caza, pesca y recolección de fauna y flora acuáticas".

bosques de pino-encino que llegaban hasta las orillas) se incrementó y se mantuvo alta.

Hacia 6000 a.n.e. el ecosistema ingresó a una fase K en la cual se incrementaban las concentraciones de materia, energía e información, se iban definiendo los subsistemas clave (como las especies y los elementos que proporcionaban la identidad del sistema), y la red de interconexiones seguía complejizándose.

Las dinámicas de los sistemas geohidrológicos y climáticos hicieron que el ecosistema no alcanzara un punto de saturación crítico, ya que cíclicamente se daban temporadas de lluvias interrumpidas por temporadas de estiaje. Con tal intermitencia (que no necesariamente era rítmica ni absolutamente predecible) se experimentaban notables cambios en las dimensiones de profundidad y extensión de los humedales, de modo que la vegetación y fauna asociadas trascendieron en función de su capacidad para responder a esa variabilidad reiterativa.

Si bien había un patrón anual de lluvias y secas, también transcurrían lustros y décadas sin precipitaciones. Ante tales situaciones de estrés, simplemente se prolongaban los procesos biológicos de letargia (como en el caso de los batracios, que se sumergen bajo la tierra y también en el caso de los bulbos, los tubérculos, los rizomas de los tulares, los macollos de los pastos y las semillas), esperando condiciones favorables para la reactivación. Los peces, siendo de pequeño tamaño, siempre podían acomodarse en los someros charcos que quedarán (aunque nunca se llegaba al extremo de que solamente quedarán charcos).

Se podría decir que los sistemas biológicos del humedal de Zanbatha aprendieron a experimentar ciclos adaptativos acoplados a los ciclos hidrológicos anuales y de periodos mayores (asociados a ciclos solares, como los de once y veintidós años), entrando en fases Ω que, más que colapsos, consistían en fases de dormancia o letargia. De modo que, cuando se ingresaba a un periodo de estiaje prolongado, la fase Ω de los organismos se prolongaba por igual lapso de tiempo. Precisamente esas cualidades adaptativas garantizaban que el ecosistema en su conjunto mantuviera una alta resiliencia.

Un milenio después, hace unos siete mil años, comenzaron a visitarlo, aunque por temporadas cortas, los primeros grupos humanos. La gran riqueza de aves, peces y flora tuvieron nuevas formas de transformación debido al modo en que los humanos comenzaron a apropiarse de ellas y a convertirlas en alimentos y en piezas utilitarias de uso cotidiano o ceremonial. Paulatinamente, los grupos humanos se multiplicaron y mantuvieron sus asentamientos por temporadas mayores.

Hasta lo que sabemos, el sistema ecológico se mantuvo en la fase K durante casi ocho mil años (entre 6000 a.n.e. hasta 1700 n.e). Desde hace seis mil quinientos años comenzó a afianzarse la historia del modo de vida lacustre, un sistema humano anidado en el sistema ecológico. Este sistema fue mucho más dinámico que el ecológico, con tal vez unos seis o siete ciclos adaptativos a lo largo de este tiempo. Con los datos paleohistóricos existentes para tan sólo los últimos 3,500 años de historia de asentamientos humanos en este valle, he podido reconstruir tres ciclos adaptativos del MVL. Ingresaremos a la historia del primer ciclo reconstruido, hacia 1500 a.n.e.

PRIMER CICLO ADAPTATIVO DEL MODO DE VIDA LACUSTRE (MVL)

Los asentamientos en las proximidades de la gran ciénaga de Zanbatha aparecieron en el Preclásico Temprano (1500-1000 a.n.e), o periodo Formativo. En este tiempo se dio la fase *r*, misma que devino en una fase *K* en el Preclásico Medio (1,000-500 a.n.e.). Durante esta fase se fortalecieron las interdependencias entre los pobladores y los componentes lacustres, incluyendo la producción maicera, que dependía de la humedad y de las lluvias temporales. Pero entonces, entre 400 a.n.e. y 200 a.n.e. sucedió algo que, para los arqueólogos no tiene una explicación ligada al contexto ecosistémico: los actores del MVL abandonaron Zanbatha. La ausencia de cerámica con iconografía olmeca (mano-garra de jaguar, hombre-jaguar, ave-serpiente, cruz cuadrada) así como de objetos exóticos que habían estado presentes en el Preclásico Medio, anota González de la Vara, han llevado a los arqueólogos a plantear que “las comunidades no lograron integrarse en unidades sociales más complejas con algún tipo de gobierno centralizado...” En otras palabras, no conformaron en aquel momento un asentamiento articulador de una estructura social preconcebida. Justo entonces comenzó el abandono del valle, reduciéndose la población de los sitios de poca antigüedad y luego también la de los antiguos. Lo que estaba ocurriendo era que los habitantes de Zanbatha escogieron integrarse al proyecto civilizatorio otomiano más retardador de aquellos tiempos: Cuicuilco.

Es muy probable que, al quedar establecida en las márgenes occidentales del Lago de Xochimilco, Cuicuilco haya tenido una importante afluencia de los expertos en la vida lacustre del vecino valle Zanbatha. Dotados de instrumentos y técnicas altamente especializados, los pescadores y cazadores pudieron fungir como mano de obra en la estructura jerarquizada que en ese entonces se establecía. Durante la fase de florecimiento de la ciudad los habitantes se distribuyeron las tareas: paulatinamente los hijos y nietos de los pescadores se emplearon como carpinteros y albañiles, aprendiendo sistemas constructivos (el amontonamiento de piedras en forma circular con orientaciones específicas). También debieron aprender sistemas complejos de siembra y chinampería, combinando maíz, chilacayote, calabaza, chile, amaranto y chíca. También en aquella etapa se afianzaron los cultos al abuelo fuego, a las deidades de la montaña nevada, de la montaña de agua y las cuevas, de las nubes y los rayos, y de la estrella vespertina, Venus. Mediante tales cultos, se buscaba asegurar el devenir cíclico de las lluvias y las secas, sin mayores altercados.

De acuerdo a Sanders y sus colaboradores, Cuicuilco lo tenía todo, y ahí florecieron y se desarrollaron al menos las siguientes veinte generaciones de las familias de pescadores originarios de Zanbatha. Hacia 300 a.n.e., Cuicuilco ya contaba con unos 10 mil habitantes, y dos siglos después ya se había duplicado la población. Pero entonces, un agente externo, cuya acción había sido inimaginable hasta entonces, interrumpió la vida de la gran ciudad. Alrededor del 100 a.n.e. el volcán Xitle hizo erupción, y su lava inundó el territorio agrícola y urbano de Cuicuilco. Los pobladores tuvieron que abandonar el sitio, introduciéndose a un territorio al nororiente de allí que se convertiría en un nuevo nodo de la geografía sagrada

mesoamericana: Dängu Hiadi, la casa vieja del Sol, luego llamado Teotihuacan.⁸ Todos se trasladaron hacia allá por lo atractivo del nuevo proyecto civilizatorio en una zona amplia, de clima agradable, propicio para la agricultura de una población que prometía ser extensísima, la mayor de todos los confines. Teotihuacan fue uno de los espacios habitados por nuestros actores, su estancia duró unos 300 años y después decidieron regresar a Zanbatha.

Mientras tanto, como lo muestran las exploraciones arqueológicas de Yoko Sugiura, el ecosistema lacustre de Zanbatha seguía disfrutando apaciblemente del graznar de las aves cada invierno, del croar de las ranas cada verano mientras caían espléndidas lluvias, y de todos los ciclos de vida y muerte de los miles de organismos que habitaban las Ciénegas; aparentemente no había presencia humana. Si venimos siguiendo el ciclo del MVL, la fase en la que se encontraba el MVL de Zanbatha en aquel entonces era la fase Ω , pues estaba totalmente colapsada, sin su principal agente: el ser humano.

EL SEGUNDO CICLO DEL MVL, EN PLENO TIEMPO TEOTIHUACANO

Tras pasar unos 400 años sin ocupación humana (según los arqueólogos), Zanbatha comenzó a repoblarse con gente otomiana. Era el comienzo de la fase Tlamimilolpa y corría más o menos el año 200 n.e. Según González de la Vara, la recolonización fue paulatina al principio, y sólo se fundaron doce sitios en el primer siglo, mientras que hacia el Clásico Medio (300-350 n.e.) ya había más de treinta sitios. Se pobló primero la orilla de Calimaya, por haber aquí mejores tierras de cultivo y poder complementar adecuadamente los alimentos lacustres con los terrestres, además de estar bien cerca del Nevado de Toluca, en cuyas cumbres realizaban ceremonias para asegurar las lluvias. Luego se pobló La Sierrita de Toluca y un sitio conocido como Santa Cruz Atzcapotzaltongo (también en Toluca), siendo éste muy extenso (103 ha) y de mayor nivel jerárquico que los otros dos, y que se extendería hacia el cerro Tollocan, sitio que superó los 2 km² hacia el Epiclásico. A partir de ahí, hacia el año 450 n.e., la población comenzó a extenderse hacia el oriente del valle, al pie de la Sierra de las Cruces, llegándose a contabilizar un total de 72 sitios hacia el año 600 n.e., manteniéndose una tasa de incremento constante hasta un siglo y medio después, cuando ya habían unos 112 asentamientos.

Hasta lo que vamos del segundo ciclo que estamos revisando, transcurrieron:

1. La fase alfa de reorganización (entre 100 y 200 n.e.) en donde todo implicaba un reaprendizaje para los teotihuacanos, descendientes lejanos de los pobladores de ese valle, Zanbatha. Las prácticas de pesca no se habían descuidado, pero las de tejido fino del tule es posible que sí, porque las fibras de los humedales de estas Ciénegas son “menos vidriosas, o sea, no se quiebran”, en comparación con las del tule del valle de México. Esta primera etapa se vivió a lo largo de unas cuatro generaciones; y

⁸ Según Agustín Rancho Márquez, comunicación personal, junio de 2014.

2. La fase *r* de crecimiento, desde aproximadamente 200 n.e. hasta 750 n.e., periodo en que se incrementaron las oportunidades para poner a prueba nuevos sitios para asentarse, a medida que se incrementaban las redes de comunicación, para el traslado de la fauna y flora lacustres comestibles y materiales utilitarios (como petates), hacia la cuenca de El Balsas. Asimismo, se exploraban puntos geográficos poblados por sus antepasados o lugares notorios que se consideraban propicios: manantiales, orillas amplias, suelos arcillosos para elaborar artefactos, formaciones rocosas para la extracción de piedra, y bosques con encino y pino para construir y para hacer fuego.

Durante aquella fase *r* la cantidad de sitios escogidos para asentarse no continuó en aumento, pero estos comenzaron a hacerse más densamente poblados, algunos más que otros. Por ejemplo, Ojo de Agua, que trajo una tradición teotihuacana y se especializó en cerámica para distribuirlas localmente fue concentrando población y jerarquizando su estructura, hasta convertirse en la ciudad de Teotenango. Al otro extremo del valle, al margen suroriental del vaso lacustre y en la falda de la Sierra de las Cruces, se instauró Mirasol, fungiendo como puerto comercial entre el valle de México y Zanbatha. Entre ambos, de acuerdo con Elena Serrano Matos, a orillas de la laguna se asentó Santa Cruz Atizapán; la zona somera se consideró tan provechosa para el aprovechamiento de fauna y flora lacustres, que entre el 500 n.e. y el 900 n.e. se construyeron cerca de 100 islotes artificiales, solamente en un área de 1 km².

Dice González de la Vara que para el año 750 n.e., el 75 % de los sitios acumulados entre el Clásico y el Epiclásico se ubicaban en lugares planos y en las riberas de las lagunas. La tasa de crecimiento de los sitios y su densidad se hicieron más intensas. Todos los sitios se caracterizaban por tener estructuras cuadrangulares y muy frecuentemente patios con estructuras circulares o semicirculares de piedra amontonada, cimentada con cieno de la laguna, y dispuestas de oriente a poniente para poder realizar las ceremonias dirigidas a la luna naciente y a Venus vespertino, deidades que, junto con el mismo Nevado de Toluca, propiciaban la lluvia, según apunta Elena Serrano Matos. Cuando los arqueólogos han analizado químicamente los suelos de las estructuras cuadrangulares en búsqueda de residuos protéicos han encontrado áreas “asociadas al consumo de alimentos; áreas de procesamiento de carnes, como mataderos, y preparación de comida en general”. Aquí es donde se procesaron los pescados, patos, gallaretas, ranas, ajolotes, acociles para su consumo, algo que se evidencia por los análisis de diferentes elementos traza en los huesos, los cuales delatan lo que ingirieron las personas en sus últimos tres meses de vida, como ya lo han expuesto Seidy Velázquez y Samuel Tejada.

Paulatinamente se ingresó a una fase de madurez (fase *K*) del segundo ciclo: entre 950 n.e. y 1150 n.e. se consolidó el estado matlatzinca⁹ a partir de la llegada de los eztlapictin (un grupo de antiguos o verdaderos chichimecas), con lo cual la ciudad de Teotenango se convirtió en una metrópolis con una posición geográfi-

⁹ Según Beatriz Albores, el estado matlatzinca dominó un vasto territorio conocido como el Matlatzinco, que abarcaba la porción inicial de la cuenca del río Balsas (Malinalco, Chalma, Chalmita, Zumpahuacán, Tenancingo) y la porción inicial de la cuenca del río Lerma.

ca estratégica, controlando toda la producción lacustre del valle. Sugiura reporta que fue en aquel periodo cuando “en la parte centro-oriente y sureste se recolectaban abundantes recursos alimenticios propios de la zona lacustre, como insectos, crustáceos, moluscos y plantas acuáticas”, mismos que eran tributados por los habitantes locales a sus señores matlatzincas. El modo de vida lacustre tuvo que intensificar las técnicas extractivas para responder a las elevadas demandas de productos acuáticos frescos, aunque la disponibilidad de ellos rebasaba la tasa de apropiación de los mismos. Esto se infiere del hecho de que, durante los siguientes trescientos años la población continuó en aumento.

UN ECLIPSE DA PAUTA A LA MILITARIZACIÓN DEL NACIENTE SEÑORÍO MATLATZINCA

El 19 de agosto de 1149 (día 2 conejo del año otomiano 9 casa) el gobernante teochichimeca de Teotenango anunció los eclipses de Sol y de Luna que habrían de acontecer durante ese mes. Lo hizo mediante el petrograbado de un jaguar apresando un glifo de eclipse entre sus fauces y garras delanteras que podemos apreciar hasta la actualidad.¹⁰ La importancia atribuida a este fenómeno celeste por parte de la élite chichimeca estriba en que aquél permitía justificar la instauración de un sistema de gobierno militar. Como ha apuntado Albores, con base en las investigaciones del arqueólogo Román Piña Chan, trece años después todo El Matlatzincó estaba militarizado.

En este nuevo esquema, el modo de vida lacustre en plena fase madura (fase *K*) se enfrentó al reto de desarrollar artes de pesca, caza y colecta aun más sofisticadas para suplir las necesidades del gobierno teochichimeca y sus tropas militares. Este gobierno militarizado fue catalogado, entre uno y dos siglos después, como potencial enemigo por parte de la naciente potencia militar nahua.

LA COHESIÓN SOCIAL Y LAS MÚLTIPLES ACTIVIDADES DEL MVL, ALGO NUEVO PARA LOS NAHUAS

Las actividades lacustres fueron consideradas por los nahuas las de menor rango en el sistema productivo. La caza, la pesca y los alimentos consumidos eran propios de gente bárbara, calificativo dado tanto a los otomíes (de por sí una palabra muy despectiva para designar a la gente *y'u hmu*) como a los chichimecas, quienes efectivamente, como anotó Soustelle, tenían una cultura material muy pobre.

Mientras que los nahuas organizaban sus actividades en función de la base alimentaria principal, es decir el grano de maíz seco (que se cosechaba entre noviembre y diciembre), los otomianos del alto Lerma (matlatzincas y otomíes) eran mucho más versátiles, siendo cazadores, pescadores, recolectores de plantas y animales tanto terrestres como acuáticos, y distribuyendo estas actividades a lo largo de todo el año. En la milpa ellos también dependían del grano seco, pero además

¹⁰ El petrograbado se localiza sobre una pared vertical a un costado de la plaza principal de Teotenango.

recogían las cañas dulces de agosto y degustaban los elotes en su estado fresco y semi-maduro, cortando una buena ración de la milpa entre agosto y septiembre. Entre marzo y abril se dedicaban a la caza del venado y en varias temporadas del año ingresaban a las ciénagas para capturar peces, crustáceos, ajolotes, ranas, gallinitas de agua, insectos, y para extraer plantas acuáticas (hojas, tallos, rizomas, bulbos y tubérculos). Todos estos productos los trocaban (crudos o ya guisados) por productos de la “tierra caliente” de El Matlatzinco. Así, establecían lazos de compadrazgo con gente de Ocuilan, Malinalco, Chalma, Tenancingo e Ixtapan de la Sal. La abundancia y diversidad de productos garantizaban la alimentación de todos los miembros de las poblaciones, así como su reproducción biológica y socio-cultural.

Este gran entramado de interacciones en El Matlatzinco brindaba una fuerte cohesión social y además mantenía a la gente activa en innumerables tareas, las cuales iban incrementándose e innovándose en función de las condiciones y necesidades emergentes. Estos dos componentes anidados en ecosistemas dinámicos y en permanente renovación, mantenían una alta resiliencia en el MVL. La eventual y provisional crisis en un proceso del complejo sistema productivo era contrarrestada con la alta productividad en otro proceso productivo.

De acuerdo con Albores, todo lo anterior, aunado a múltiples antecedentes del temple de los guerreros otomianos¹¹ y a la potencial alianza de los matlatzincas con los purépechas, constituía una amenaza latente para la Triple Alianza mexicana. De ahí que el tlatoani mexica-tenochca Axayácatl desarrollara una estrategia “poco usual, aplicada en casos extremos” que, me parece, fue precisamente puesta en práctica para vulnerar la resiliencia del MVL, atacando para ello los componentes más fundamentales de aquel modo de vida. En los primeros años del fulminante ataque mexica-tenochca, los invasores se dedicaron a estigmatizar a los pescadores, cazadores y recolectores del valle de Toluca, impidiéndoles ejercer sus oficios. Además, desacreditaron los alimentos acuáticos y fueron despectivos hacia quienes los consumían.

Incluso la manera de manejar la milpa, haciendo fiesta para cortar cañas dulces y elotes en agosto, era reiteradamente calificada por los mexica-tenochca como torpe y poco provisoria, ya que reducían la disponibilidad de mazorcas de grano seco.

FASE OMEGA DEL SEGUNDO CICLO: EL MVL ES DEBILITADO POR LOS MEXICA-TENOCHCAS Y DESTRUIDO POR LOS ESPAÑOLES

La base de sustento de los gobernantes tepanecas, matlatzincas y chichimecas y sus macehuales quedó destruida inmediatamente después de que aquellos fueron eliminados o sometidos por Axayácatl en 1474 y 1476, hasta 1480.¹² Los señores

¹¹ Como lo registran Durán y Torquemada, está el caso de Botzanga, guerrero otomí de Temoaya, quien embistió a Axayácatl, hiriéndole gravemente en el muslo.

¹² De acuerdo con las investigaciones de Albores y de González de la Vara, en el territorio de El Matlatzinco se fundaron, entre 950 y mediados de 1400, varios centros de poder, mismos que existían

de Teotenago y Tenancingo fueron muertos (Albores, 1995: 129) mientras que el señor natural de Calixtlahuaca (Chimaltecuhtli), al mostrar fidelidad a los mexica-tenochcas, mantuvo su cargo y también quedó a cargo de Tollocan.

Como ha apuntado Pedro Carrasco Pizana, fue aquel periodo uno de profunda crisis para las poblaciones matlatzincas. Violentamente estigmatizadas, muchas familias fueron obligadas a emigrar fuera de la zona lacustre, como a la región chontal de Guerrero, para repoblar lugares destruidos por los mexicas. Además, apunta Albores, familias enteras de nahuas pasaron a ocupar cada localidad que había sido habitada únicamente por los matlatzincas. De acuerdo con Margarita Menegus, gente de los pueblos lacustres de Toluca, Metepec, Calimaya y Ocoyoacac tuvieron que trabajar en las milpas o “sementerías imperiales” alrededor de San Mateo Atenco. La cosecha debía consistir únicamente en maíz maduro, garantizándose con ello el alimento para la fuerza militar y las familias gobernantes mexica-tenochcas.

El estado crítico en que se encontraban los actores del MVL, se recrudeció con la invasión de los españoles en 1519-1521. Como anotan Margarita Menegus y Peter Gerhard, entre 1521 y 1528 se introdujeron miles de cabezas de ganado vacuno, porcino, lanar y equino, lo que fue desplazando a los pobladores ribereños hacia las laderas de las montañas y fue restringiendo enormemente el desarrollo normal de sus actividades lacustres. Además, en 1531 se descubrieron minas en Temascaltepec y durante los años subsiguientes, se encontraron varios sitios más. Habitantes de los pueblos de Almoloya del Río, Calimaya, Chapultepec, Metepec y Toluca tuvieron que abandonar el MVL e irse a trabajar a las minas de Temascaltepec. Otra opción consistió en contratarse en la Hacienda de Atenco para impulsar el desarrollo ganadero, el cual era altamente dependiente de la laguna por brindar abundante agua y forraje.

Fue ciertamente una fase llena de dificultades debido a que tuvieron que congregarse por la fuerza en pueblos ordenados a la manera española (Gerhard, 1986: 280) y a que tuvieron que sobrevivir las epidemias ocurridas en 1545, entre 1576 y 1581 y entre 1595 y 1597.¹³

(aunque con inestabilidades políticas internas) hasta la invasión mexica-tenochca. Los centros eran los siguientes: i) en el valle de Toluca: Teotenango (instaurado entre 950 y 984 por matlatzincas y luego por verdaderos chichimecas); Tecaxic-Calixtlahuaca (levantado en las laderas del cerro Tenismó, a inicios de 1200, por el chichimeca Xolotl); y Tollocan (fundado en el cerro Tolotzin a inicios de 1400 por tepanecas); y ii) en el alto Balsas, Malinalco y Tenancingo (fundado a inicios del siglo XI, por Xolotl).

Dado que los centros de poder fueron gobernados por matlatzincas, tepanecas y chichimecas, siempre hubo pugnas. Cuando Tecaxic-Calixtlahuaca reemplazó a Teotenango como centro político del valle, aquellos dos centros más el de Tollocan tenían a tres señores rotándose el puesto principal, lo cual “generaba diferencias y pleitos entre los linajes poderosos” (González de la Vara). Todo esto debilitó la estructura de una especie de “triple alianza” de El Matlatzinco, al punto que cuando Axayacatl invadió en 1474, le resultó relativamente fácil destituir a los señores de Teotenango, Tenancingo y al gobernante tepaneca Cachimaltzin de Tollocan, refrendando a Chimaltecuhtli como señor de Calixtlahuaca y encargándole además el centro administrativo, Tollocan.

¹³ Según Gerhard, se tiene registro de que los dos últimos brotes epidémicos hicieron caer el número de “tributarios indios” de 10,620 en 1569 a 5,300 en 1597.

LA REORGANIZACIÓN ES POSIBLE GRACIAS A LA MILENARIA INERCIA
CULTURAL: INGRESO AL TERCER CICLO

Aunque poco a poco, el reencauce del MVL fue dándose, ingresando a una fase α de reorganización. Albores comenta que “el hecho de que el territorio acuático que pudieron retener los indígenas no fuera objeto, en sí, de la codicia de los españoles y de sus descendientes, permitió que aquél se conservara como *bienes comunales*, lo cual posibilitó la continuidad no sólo de los trabajadores de la Ciénega, sino también del modo de vida lacustre”.

En este contexto histórico, los habitantes ribereños iban recuperando sus actividades de caza, pesca y corte y colecta de animales y plantas lacustres, en particular cuando las autoridades españolas cooperaban. No todos los extraños que comenzaban a asentarse en esta zona lacustre eran insensibles a la principal forma de producción local: se sabe que el Virrey don Luis de Velasco comprendía que “los de Almoloya tienen de costumbre por granjería la pesca y la caza” (Archivo del síndico de San Antonio la Isla). En 1560, el mismo virrey amparó a los vecinos de Almoloya (de la estancia de Atenco del Lic. Altamirano, primo de Hernán Cortés), y que eran pescadores y cazadores, sobre terrenos de pesca y caza. Con la finalidad de protegerles “de los españoles, negros y mulatos [que] les impiden el provecho de sus recursos, [el Virrey] manda que los residentes de la Hacienda de Atenco no les roben sus vestidos de lana (lo cual lo hacen con el pretexto de que es lana de las ovejas de la hacienda) y que no les impidan el paso a la laguna”. (Documento Barona, 1862).

La Recopilación de Leyes de Indias ordenaba, en 1680: “... que a los indios se les dejen tierras... y las aguas y riegos”. Adicionalmente, se les reconocía las tierras comunales y pudieron evitar la violación a sus derechos y a sus tierras, ya que se ordenaba que no se les quitasen los terrenos que antes hubiesen poseído.

REIVINDICANDO EL TERRITORIO HUMEDAL Y EL MVL:
LA FASE DE CRECIMIENTO DEL TERCER CICLO

Las primeras décadas del siglo XVII son importantes por la reivindicación de pueblos indígenas ribereños que habían estado subordinados. El año 1743 marca un momento crucial de la fase de crecimiento renovado entre los pueblos de la zona lacustre del alto Lerma mexiquense (ZLALM). Es el año en que se cumple un siglo desde que se hubiera registrado el menor número de “tributarios indios” (de 2,447), alcanzándose 5,650 familias indias.

También fue el año en que San Mateo Mexicaltzingo y San Pedro Tultepec fueron reconocidos como cabeceras indias, tras una larga lucha de los habitantes locales por lograr su independencia. Este logro les permitió reivindicar lo propio y recuperar sus referentes culturales relativos a la laguna, iniciándose un auge en el MVL. Gracias a Margarita Loera y Chávez, se sabe que en 1764 y en 1786:

los naturales de San Lorenzo y Mexicaltzingo solicitaron al gobierno virreinal que les permitiera continuar pescando y explotando el tule que [...] se obtenía

en sus términos territoriales. Los de San Lorenzo denunciaron que [...] únicamente subsistían de la explotación de la laguna, pero que para poder hacer uso de ella tenían que pagar una pensión semanal a las haciendas.

Como señala Albores, los trabajadores lacustres, “escudados por la fuerza de los orígenes milenarios de su actividad... siempre se aferraron a su antigua forma de vida”, de tal manera que, ante las nuevas condiciones logradas, rápidamente revitalizaron sus costumbres tradicionales.

Entre mediados de 1700 y mediados de 1800 se vivió la fase r de crecimiento del MVL. Así como la fase α , esta fase r fue distinta a las de los dos ciclos anteriores, porque las condiciones eran diferentes. Habían nuevos actores y nuevas necesidades de aprovechamiento de lo ofrecido por las ciénegas: los hacendados de la Hacienda de Atenco seguían introduciendo cientos de cabeza de ganado para que se alimentara de la cerbatana proveída por los humedales. Además, como sucede en la fase r , fue incrementándose el potencial para el cambio y la cantidad de interacciones entre los nuevos actores sociales del socioecosistema. Dice Albores:

La ganadería fue el centro de un tupido tejido de relaciones que abarcó, en un complejo abanico con múltiples matices, a todo el ámbito social... La crianza de ganado no sólo permitió la fundación de las grandes empresas de los primeros encomenderos, sino también fue una actividad económica en la que, tiempo después, se ocuparon pequeños propietarios y las repúblicas de indios. En términos socioeconómicos tenemos las relaciones establecidas en torno a la consecución de productos forrajeros –lo que nos remite a los pleitos entre españoles y los pueblos de indios, y entre estos últimos–, a la comercialización del ganado y de sus derivados, al ganado usado en la arriería. Se diversificaron los tipos de cuidadores de ganado, así como de propietarios y de trabajadores empleados en la industria alimenticia y la jabonera, en los obrajes, en la curtiduría, y en la peletería.

SE INGRESA A UN PROCESO DE ACUMULACIÓN,
AUNQUE NO POR MUCHO TIEMPO...

No obstante lo anterior, Albores comenta que el sector tradicional de trabajadores lacustres pudo trascender gracias a que conservó la propiedad comunal más allá de 1933 (cuando la nacionalización del territorio) y porque “los despojos laguneros” producto de la ganadería “no incidieron en el cambio tecnológico ni en las formas de explotación acuáticas”. Es decir, que, como afirma la autora “el modo de vida lacustre pudo mantener una continuidad”. A esta continuidad, consistente en un “proceso general de acumulación” podemos denominar la fase de madurez, fase K , del tercer ciclo que estamos recorriendo.

Albores identifica que entre 1942 y 1960 aquella continuidad de las primeras décadas del siglo XX experimentó “el fin del proceso general de acumulación” porque “la base material acuática desapareció abrupta y rápidamente” debido al despliegue industrial en el valle de México y en el valle de Toluca. Es decir, se ingresó a una fase Ω , de colapso.

EL SISTEMA CAPITALISTA SE INSERTA DE LLENO EN LA ZONA LACUSTRE

Las obras del Sistema Lerma tuvieron dos propósitos: extraer el agua del acuífero y conducirla a la insaciable Ciudad de México, y desecar la laguna de Lerma para disponer de terrenos agrícolas (ver *DOF*, 11 de septiembre de 1943). En la época cardenista (1934-1940) habían quedado sentadas las bases para convertir a México en un país capitalista y fundamentalmente dedicado a la agroindustria, para lo cual, anota Alejandro Tortolero Villaseñor, aquel gobierno se enfocó en “extender la irrigación en los campos y las haciendas y reducir los excesos de agua en los lagos de Chalco, de Zacapu y Lerma”. Pero en el valle de Toluca el proyecto agrícola no fue tan exitoso como el de la manufactura industrial. Para 1965, no solamente estaba consolidado el corredor Lerma-Toluca, sino que éste ocupaba el segundo lugar de las tres zonas industriales que se habían desarrollado en el Estado de México y, cinco años después, se posicionaba en el segundo lugar a nivel nacional, produciéndose alrededor del 40% de los bienes y servicios del país.

Como he apuntado en otro lugar, todo esto, que consiste en el subsistema “modo de vida capitalista” y que se anidó en el ecosistema de humedal, llevó a que el paisaje de la ZLALM se desfigurara drásticamente.

¿EL COLAPSO DEL TERCER CICLO FUE PARA SIEMPRE
O SOMOS TESTIGOS DE UN RESURGIMIENTO?

Tanto las investigaciones de Albores, como las de otros autores y las propias, dan cuenta de aquel colapso derivado de la destrucción de cientos de manantiales, la extracción del agua del acuífero del valle de Toluca mediante el Sistema Lerma y las obras de drenaje para, según consta en el Archivo Histórico del Agua, “resolver el grave problema de inundaciones que frena [sic] el desarrollo regional”.

Sin embargo, en *Ecología y cultura lacustres en Almoloya del Río, 1900-2004. Hacia el manejo sustentable de Chiconahuapan, un remanente de la Laguna de Lerma*, he demostrado que aquel colapso no consistió en un evento estático y último (ver, en la obra referida, la sección “El caso particular: la recuperación hidrológica del vaso lacustre de Chiconahuapan desde 1970”).

Albores opina que el MVL llegó a su fin, junto con la Laguna de Lerma, hacia 1960. Todo depende de cómo se observe. Aunque los habitantes locales incursionaron en otras actividades productivas, ya fuera en negocios familiares (por ejemplo, en la fabricación de muebles de madera) o como asalariados en empresas nacionales y extranjeras, eso no impidió a algunos reingresar a la laguna cuando ésta se recuperó parcialmente. Tal fenómeno puede verse como algo muy alejado del modo de vida lacustre original, o como el germen para un renovado modo de vida lacustre, adaptado a las condiciones prevalecientes actuales.

Al leer el libro *Tules y sirenas. El impacto ecológico y cultural de la industrialización en el Alto Lerma*, de Albores, y también al recorrer los humedales en 1995, me pregunté: ¿cómo puede decirse que el MVL y la laguna de Lerma desaparecieron para siempre en 1960, si estoy presenciando, en 1995 y aún en 2002, extensos humeda-

les riquísimos en fauna y flora lacustres, y a gente local de varias edades que pesca con los instrumentos tradicionales y prepara guisados, mientras que otros cortan y tejen el tule? Es cierto que es poca gente, pero su entusiasmo y presencia cada fin de semana, así como la participación de gente joven (entre veinte y treinta años) da cuenta de una trascendencia y adaptabilidad más que de una extinción.

EL MODELO DE LOS SISTEMAS ADAPTATIVOS:
UN MARCO DE REFERENCIA QUE ALIENTA LA ESPERANZA

En el proceso de indagación iniciado en 2002 me dediqué a buscar otros casos de capacidad regenerativa de los ecosistemas y de aquellos que contienen a grupos humanos con una cultura asociada a la naturaleza (comúnmente llamados socio-ecosistemas). Fue entonces cuando encontré el modelo explicativo de C. S. Holling, sobre los sistemas adaptativos y las fases por las cuales atraviesan, sin cesar, estando éstos anidados en otros, produciendo las panarquías. Ahí había una herramienta con la que podía demostrar que las Ciénegas de Lerma se encuentran, desde 1960 y hasta la actualidad, no en un estado colapsado, sino atravesando (aunque con muchas dificultades, eso sí) una fase de reorganización del MVL.

La naturaleza es cíclica y dinámica, creando siempre oportunidades para resurgir, y dado que tiene memoria, recupera aquellas estructuras, funciones y procesos que la caracterizan. La mayoría de las veces logra recuperarse de maneras sorprendidas, a veces insospechadas o desconocidas para nosotros. Por otro lado, en lo que respecta a la cultura humana, como ha dicho Trotski: "el modo de vida es inmóvil y difícil de cambiar". Los humanos somos sumamente conservadores en cuanto a nuestra manera de interactuar con la naturaleza, de modo que, una vez que esa forma de interactuar está impregnada en nuestra cultura, reincidimos infinitas veces en las prácticas de comunicación simbólica y de apropiación de los aspectos tangibles e intangibles que son relevantes para nuestra reafirmación como pueblos.

Es por ello que, cuando los humedales resurgieron a partir de la década de 1980, los nostálgicos pescadores, cazadores y cortadores de tule, regresaron para revivir el añorado MVL. Sin duda, como argumenta Albores, es apenas una reminiscencia del MVL de los ciclos anteriores, pero en definitiva, están ahí los principales rasgos que lo definen como tal.

Ahora, la pregunta es: ¿Qué tipo de reorganización está dándose en el MVL? ¿Depende exclusivamente de los actores que creen en ese modo de vida y que colocan a la laguna en el centro de su propósito de vida? ¿De qué manera nuevos actores que entran al escenario pueden incidir favorablemente en ese proceso? ¿Puede ser la UAM-Lerma un actor potencialmente facilitador de esa cultura lacustre? ¿Es esa una pregunta legítima, y ha de hacerse individualmente o colectivamente? ¿Quién(es) y en qué contexto está(n) dispuesto(s) a abordarla con la sensibilidad intercultural que se requiere? ¿Qué más requeriremos? ¿Qué potencial tiene un modo de pensar integrador? Quizás la manera integradora de pensar sea el mayor reto. De ahí se desprenderán posibles respuestas y acciones pertinentes para todo lo demás.

BIBLIOGRAFÍA

- Archivo histórico del agua, aguas superficiales. Caja 3372, Exp. 46112, fojas 19 y 28.
- Albores, Beatriz. 1995. *Tules y sirenas. El impacto ecológico y cultural de la industrialización en el Alto Lerma*. El Colegio Mexiquense, A.C. y GEM.
- Albores, Beatriz. 2013. "Zanbatha. Etapas históricas del valle de Toluca". En Bastida Muñoz, Mindahi, Beatriz A. Albores Z. y Geraldine Patrick Encina (coords.), *Zanbatha. Valle de la Luna*, pp. 5–58. UAM-Unidad Lerma.
- Béligand, Nadine. 1993. *Códice de San Antonio Techialoyan A 701, manuscrito pictográfico de San Antonio la Isla*. GEM, IMC.
- Berkes, Fikret and Iain Davidson-Hunt. 2008. "The cultural basis for an ecosystem approach: Sharing across systems of knowledge". En Waltner-Toews, David, James J. Kay and Nina-marie E. Lister (ed.), *The Ecosystem Approach. Complexity, Uncertainty and Managing for Sustainability*. Columbia University Press.
- Carrasco-Pizana, Pedro. 1950. *Los Otomíes. Cultura e historia prehispánicas de los pueblos mesoamericanos de habla otomiana*. INAH e Instituto de Historia, UNAM.
- Secretaría de Agricultura y Fomento. Acuerdo que reserva para satisfacer necesidades agrarias de varios pueblos, los terrenos que se descubran con motivo de trabajos de captación de aguas de la laguna de Lerma. *Diario Oficial de la Federación*, 11 de septiembre, 1943.
- Durán, Fray Diego. 2006. *Historia de las Indias de Nueva España e Islas de la Tierra Firme*. Editorial Porrúa. Edición Paleográfica preparada por Ángel Ma. Garibay K.
- Gerhard, Peter. 1986. *Geografía histórica de la Nueva España 1519-1821*. IHH, IG, UNAM.
- Giddens, Anthony. 1987. *Social Theory and Modern Sociology*. Stanford University Press.
- González-de-la Vara, Fernán. 1999. *El valle de Toluca hasta la caída de Teotihuacan*. INAH.
- González-de-la Vara, Fernán. 2013. "Tres mil años de historia prehispánica en el Valle de Toluca". En Bastida Muñoz, Mindahi, Beatriz A. Albores Z. y Geraldine Patrick Encina (coords.), *Zanbatha. Valle de la Luna*, pp. 75–94. UAM-Unidad Lerma.
- Holling, C. S. 2000. "Theories for sustainable futures". *Conservation Ecology*, 4(2):art7.
- Holling, C. S. 2001. "Understanding the complexity of economic, ecological and social systems". *Ecosystems*, 4:390–405.
- Holling, C. S. and Lance Gunderson. 2002. "Resilience and adaptive cycles". En Gunderson, L. and C.S. Holling (ed.), *Panarchy. Understanding transformations in Human and Natural Systems*, pp. 25–62. Island Press.
- Holling, C. S., Lance Gunderson, and Garry D. Peterson. 2002. "Sustainability and panarchies". En Gunderson, L. and C.S. Holling (ed.), *Panarchy. Understanding transformations in Human and Natural Systems*, pp. 63–102. Island Press.
- Kay, James K. 2008. "Framing the situation. Developing a system description". En Waltner-Toews, David, James J. Kay and Nina-Marie E. Lister (ed.), *The Ecosystem Approach. Complexity, Uncertainty and Managing for Sustainability*, pp. 15–36. Columbia University Press.
- Leff, Enrique (coord.). 2000. *La complejidad ambiental*. Siglo XXI Editores, CIIH, PNUMA.
- Loera-Chávez, Margarita. 2009. *Calimaya y Tepemaxalco. Tenencia y transmisión hereditaria de la tierra en dos comunidades indígenas. Época Colonial*. Cuadernos de Trabajo del Departamento de Investigaciones Históricas, 18. INAH.
- Martínez-Alier, Joan. 1998. *Curso de economía ecológica*. Textos Básicos para la Formación Ambiental. No. 1. PNUMA. Con la colaboración de Jordi Roca y Jeannette Sánchez.

- Martínez-Alier, Joan and Jordi Roca-Jusmet. 2000. *Economía ecológica y política ambiental*. PNUMA y FCE.
- Menegus B., Margarita. 1991. "La organización económico-espacial del trabajo indígena en el Valle de Toluca, 1530-1630". En Miño, Manuel (comp.), *Haciendas, pueblos y comunidades*, pp. 21–51. Consejo Nacional para las Culturas y las Artes.
- Patrick, Geraldine. 2012. *Ecología y cultura lacustres en Almoloya del Río, 1900-2004. Hacia el manejo sustentable de Chiconahuapan, un remanente de la Laguna de Lerma*. UAM-Lerma.
- Redman, Charles L. and Ann P. Kinzing. 2003. "Resilience of past landscapes: Resilience theory, society and the longue durée". *Conservation Ecology*, 7(1):art14. <http://www.consecol.org/vol7/iss1/art14/>
- Serrano-Matos, Elena. 2008. "El ritual en el área lacustre de Santa Cruz Atizapán". En Kugel, Verónica y Ana María Salazar (eds.), *VI Coloquio Internacional sobre Otopames*, pp. 201–218. UNAM.
- Soustelle, Jacques. 1993. *La familia otomí-pame*. FCE.
- Sugiura, Yoko. 1990. *El epiclásico y el valle de Toluca. Un estudio de patrón de asentamientos*. Tesis de doctorado, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM.
- Tortolero-Villaseñor, Alejandro. 2000 *El agua y su historia. México y sus desafíos hacia el siglo XXI*. Siglo XXI.
- Velázquez, Seidy y Samuel Tejeda. 2014. "La alimentación en la ciénaga del Alto Lerma: un acercamiento a través de elementos traza". En XXX Mesa Redonda de Antropología de la Sociedad Mexicana de Antropología.
- Walker, B. and N. Abel. 2002. "Resilient rangelands: Adaptation in complex systems". En Gunderson, Lance and C.S. Holling (ed.), *Panarchy. Understanding transformations in Human and Natural Systems*, pp. 293–314. Island Press.
- Westley, Frances, Stephen R. Carpenter, William A. Brock, C. S. Holling and Lance Gunderson. 2002. "Why systems of people and nature are not just social and ecological systems". En Gunderson, Lance and C.S. Holling (ed.), *Panarchy. Understanding transformations in Human and Natural Systems*, pp. 103–119. Island Press.

⊙ *Esta es una página en blanco.* ⊙

EVOLUCIÓN Y HEURÍSTICAS BIOINSPIRADAS: LAS NUEVAS HERRAMIENTAS DE LA COMPUTACIÓN

*Ricardo Marcelín-Jiménez**

La evolución es el movimiento infinito de cuanto existe, la transformación incesante del universo y de todas sus partes desde los orígenes eternos y durante el infinito del tiempo.

Élisée Reclus

* * *

EN este capítulo presentaremos el problema del agente viajero y explicaremos cómo, hasta hoy, no se conoce un método eficiente, en tiempo consumido, para encontrar la solución exacta de cualquier instancia de este problema. Veremos que éste pertenece a una familia de problemas difíciles. Al mismo tiempo, aprovecharemos el problema para ejemplificar el uso de heurísticas con base en modelos inspirados en algunos sistemas biológicos y que emplean procesos aleatorios subyacentes. Veremos que con estas heurísticas es posible encontrar soluciones aproximadas a dicha clase de problemas en un tiempo razonable.

EL PROBLEMA DEL AGENTE VIAJERO

Comencemos por considerar el siguiente problema:

El señor Martínez es un agente viajero que recorre las ciudades que su compañía le asigna para ofrecer sus productos. Su jefe le ha entregado una nueva lista de destinos. En las próximas semanas deberá visitar 20 ciudades. Además, le han puesto un límite a sus gastos de representación. Suponiendo que existe un camino directo entre cada una de las ciudades que tiene asignadas y que parte de su ciudad de residencia, ¿en qué orden debería visitar estas ciudades para acumular la menor cantidad de kilómetros, sin pasar dos veces por ninguna de ellas?

En la ciencia de la computación los problemas pueden clasificarse de acuerdo con la cantidad de recursos necesarios para su solución. Se debe tomar en cuenta el número de pasos, la cantidad de memoria requerida o la información que debe

* Departamento de Ingeniería Eléctrica, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. / calu@xanum.uam.mx

intercambiarse para encontrar la solución. El costo computacional mide este precio como una función del tamaño del problema.

Pensemos en un sencillo ejemplo: supongamos que tenemos una lista de nombres que debe ordenarse lexicográficamente, es decir, en orden alfabético. Intuimos que nos tomaría un esfuerzo ligeramente mayor ordenar una lista de 20 nombres que una pequeña lista de tan sólo 5 nombres. En ambos casos, sin embargo, decimos que se trata de dos instancias diferentes del mismo problema. En algún momento de nuestra vida, todos hemos abordado y resuelto este problema. De aquí que sabemos que es posible resolver las diferentes instancias del mismo. Igualmente, sabemos que el costo de su solución crece *moderadamente* con el tamaño de la instancia. Para contrastar lo que entendemos por moderadamente, revisemos un contraejemplo y retomemos el caso con el que iniciamos.

En el problema del agente viajero debemos reconocer todas las rutas posibles y comparar su longitud. Si el Sr. Martínez tuviera 3 ciudades que visitar, entonces podría elegir la primera de su ruta de 3 formas posibles, una vez elegida, sólo le quedarían 2 ciudades de entre las que podría escoger la segunda parada de su itinerario. Finalmente, sólo le quedaría 1 ciudad que visitar. Entonces tenemos $3 \times 2 \times 1$ rutas distintas, entre las que debemos comparar sus *costos*, para determinar la más corta. Si nuestro agente tuviera asignadas 4 ciudades, entonces tendríamos que comparar $4 \times 3 \times 2 \times 1$ rutas distintas. En general, si se tuvieran n ciudades por visitar, deberían evaluarse $n \times (n - 1) \times (n - 2) \times \dots \times 3 \times 2 \times 1$ rutas (los puntos suspensivos significan que en esa multiplicación aparecen en orden descendente todos los demás enteros entre $n - 2$ y 3). El resultado de esta multiplicación suele denotarse por la expresión $n!$, y se le llama el *factorial* de n . El factorial nos sirve para calcular de cuántas formas podemos ordenar n objetos distintos, a lo que llamamos una permutación. Aquí presentamos una pequeña tabla correspondiente al factorial de los primeros 10 enteros.

$$1! = 1$$

$$2! = 2$$

$$3! = 6$$

$$4! = 24$$

$$5! = 120$$

$$6! = 720$$

$$7! = 5040$$

$$8! = 40320$$

$$9! = 362880$$

$$10! = 3628800$$

¿Puede el lector determinar cuántas rutas deben compararse si la agenda del viajero incluyera 20 ciudades? El número puede determinarse con facilidad, sin embargo, las comparaciones por hacer podrían tomar mucho tiempo, aun valiéndose de una buena computadora.

El caso del agente viajero nos muestra que no todos los problemas tienen el mismo costo computacional. Observamos que, en este caso, su costo crece muy rápidamente con el tamaño de la instancia. Estamos hablando de una familia de problemas para la que, aunque parezca increíble, no se conocen métodos exactos de resolución, en tiempos “cortos” (por ejemplo, los más rápidos tardarán lo que dura, en promedio, la vida de un ser humano), cuando sus instancias tienen un tamaño mediano.

Aquí vale la pena detenernos para aclarar que, cuando hablamos de la familia del agente viajero no nos referimos a “la hermana que tiene un marido borracho” o “al tío que está en la cárcel resolviendo un dilema en el que le va la vida” (por ejemplo, el dilema del prisionero del capítulo “La evolución de la cooperación... entre computadoras”, p. 191). A lo que nos referimos es que, al igual que en el problema recién presentado, existe un conjunto de problemas cuyo costo crece muy rápidamente con el tamaño de sus instancias y podemos decir que, literalmente, “explotan”. Estrictamente hablando, deberíamos referirnos entonces a la familia de problemas a la que pertenece el problema del agente viajero. Al final de este capítulo abundaremos sobre este asunto.

De momento sabemos que podemos ordenar, aun sin una computadora, una lista de 20 nombres. En contraste, para una instancia del agente viajero con tan sólo 20 ciudades tendríamos que organizar a una orden de monjes para que, por generaciones, se consagraran a la búsqueda de la solución exacta. En este caso, además, tendríamos que confiar en que, cuando los monjes hayan terminado su cálculo, exista una máquina del tiempo con la que pudieran retornar al pasado e informar a nuestro agente viajero cuál es la ruta óptima.

Más allá del reto intelectual que representa abordar la familia de los problemas a los que pertenece el problema del agente viajero, sucede que a esta familia pertenecen muchos problemas aplicados, de diferentes ramas del conocimiento, cuya solución nos permitiría mejorar algún aspecto de la vida cotidiana; ofrecer condiciones de mayor seguridad o conseguir el máximo beneficio con una cantidad mínima de insumos. Se les llama problemas de *optimización combinatoria* y su solución correcta puede representar mucho dinero, no sólo porque implican el ahorro de recursos, sino porque, en algunos casos, existen premios para quienes logren resolverlos. Por desgracia, hemos visto que estos problemas son muy complejos y su solución exacta es una tarea que, hasta ahora, nos ha rebasado.

LA EVOLUCIÓN AL RESCATE, O ECOS DEL VIAJE DE CHARLES DARWIN A LAS GALÁPAGOS

Los científicos e ingenieros de la computación no pueden conformarse con saber que hay problemas muy difíciles, para los que no se conocen métodos exactos y efi-

cientes que les permitan resolverlos. La computación es una rama del conocimiento que está permanentemente buscando y reutilizando métodos, que han rendido frutos en otras partes, para incorporarlos como parte de su *caja de herramientas*.

Hasta hace algunas décadas se consideraba que la evolución operaba sólo en los sistemas biológicos, produciendo el fenómeno al que denominamos *vida*, sin embargo, cada día se acepta más y más que la evolución es un procedimiento heurístico que permite encontrar una solución suficientemente buena a un problema de optimización y que funciona, por igual, tanto en sistemas biológicos como en sistemas creados por el hombre, produciendo fenómenos tales como la cultura y la economía. Ya volveremos sobre este punto.

Dos cosas debemos aclarar, antes de continuar con nuestro relato: ¿qué es una heurística?, y ¿qué queremos decir con *solución suficientemente buena*? Un procedimiento heurístico se refiere a una *receta* o técnica empírica para abordar un problema mediante la que es posible encontrar una solución con rapidez, cuando una búsqueda exhaustiva es imposible o demasiado cara. Pero, entonces, con esto ¿encontramos la solución o no? Bien, un procedimiento heurístico sólo nos permite encontrar una solución aproximada. En muchos de los casos, inclusive, nos permite saber qué tan cerca estamos del óptimo y, con ello, determinar si la solución que produce es *suficientemente buena*.

Inspirado por los mecanismos de la evolución, en 1975, John Holland comprendió que podría adaptar estas ideas para atacar problemas computacionales difíciles, como el caso del agente viajero. Holland inventó los *algoritmos genéticos*, es decir, programas para computadora cuyas soluciones “evolucionan”. En particular, se enfocó en la forma de representar, dentro de la computadora, las condiciones necesarias para que, por sí sola y mediante mecanismos de *evolución*, encontrara una buena solución para un problema difícil de resolver. Presentamos, a continuación, las propiedades de estos algoritmos:

1. Que exista un espacio de soluciones posibles, llamado espacio de diseño o espacio de búsqueda. En el problema del agente viajero este espacio está formado por el conjunto de todas las permutaciones con las n ciudades que deben visitarse. Sabemos que la solución exacta del problema es un *individuo* que “vive” o se encuentra en este conjunto.
2. Que sea posible representar las posibles soluciones mediante esquemas de codificación. Esto es, que exista una forma de indicar cómo se construye cada permutación. En el ejemplo que nos ocupa, necesitamos algo así como una receta para construir un recorrido válido sobre el conjunto de ciudades.
3. Que de alguna forma existan lectores de estos códigos, capaces de decodificarlos y representarlos como cierta clase de individuos o agentes. En nuestro caso se trata de una computadora, o varias, que interpretan los códigos para convertirlos en recorridos válidos. Cada posible recorrido es una entidad surgida a partir de un esquema decodificado por la computadora.
4. Los individuos se colocan o se “liberan” en un espacio de búsqueda. El am-

biente del espacio de búsqueda impone restricciones sobre estos. Dichas restricciones implican una función de aptitud que evalúa a cada individuo, entendido éste como una posible solución del problema de optimización. En nuestro caso, la aptitud se evalúa por la distancia acumulada en cada recorrido. Decimos que un recorrido $R1$ es más apto que un recorrido $R2$, si el primero acumula menos kilómetros que el segundo.

Decimos que se *evoluciona* para “localizar”, en el espacio de búsqueda, aquellas soluciones con la mejor aptitud. Esta *búsqueda* se desarrolla de la siguiente forma:

- Los códigos representan a los individuos que forman una población. En nuestro caso, la población de permutaciones o recorridos entre las n ciudades. Sugerimos pensar en cada uno de estos individuos como si se tratara de una especie de bicho.
- Los códigos pueden variar a lo largo del tiempo, a través de diferentes operaciones tales como el *entrecruzamiento* y la *mutación*, usando la metáfora de la combinación del código genético y sus posibles mutaciones.¹ O sea que ahora vamos a dejar que nuestros bichos puedan tener descendencia. Sobre los individuos actúa un proceso de selección con base en una función de aptitud. Aquellos con menor aptitud tienen mayor probabilidad de desaparecer de la población.
- Existe también un proceso de replicación. Aquellos bichos con una mayor aptitud tienen mayores probabilidades de replicarse generando más variaciones a partir de sus códigos. Cuando hablamos de variaciones nos referimos a la posibilidad de que algunos bichos introduzcan cambios o *mutaciones* en sus códigos. Algunas veces estos cambios no aportan o, incluso, empeoran su aptitud pero, en algunas afortunadas ocasiones, es posible mejorar la aptitud introduciendo alguna novedad.
- Puesto que los bichos heredan a sus descendientes las características que los convierten en los más aptos, entonces observaremos cómo, en las generaciones sucesivas, se repiten algunos individuos que representan, o codifican, recorridos *interesantes*.
- Con el tiempo, se replican y se difunden, entre la población, aquellos módulos o bloques de construcción que contribuyen a mejorar la aptitud de los bichos que los incorporan. Finalmente, el proceso de variación, selección y replicación se repite recursivamente sobre la población de manera que la reproducción de la última ronda actúa como la nueva generación.

Cuando la evolución funciona bajo las condiciones adecuadas, podemos esperar los siguientes resultados:

¹ Para ver más detalles, el lector puede remitirse a la sección “El algoritmo genético: 1a. aproximación” (p. 177), del capítulo “Evolución y algoritmos genéticos: orígenes, precursores y aplicación”.

- La creación del orden a partir de la aleatoriedad.
- El descubrimiento de diseños aptos.
- La adaptación continua.
- La acumulación de información.
- La emergencia de patrones.
- El aumento de los recursos dedicados a los diseños exitosos.

De vuelta al problema del agente viajero, podemos proponer a un conjunto arbitrario de soluciones como población inicial a evolucionar. Todas las soluciones iniciales deben ser diferentes y, probablemente, bastante pobres en su aptitud. Sin embargo, luego de varias *generaciones*, comenzarán a emerger ciertos patrones que, con frecuencia, relacionan a las mismas ciudades. Es decir, se empieza a reconocer que, digamos, luego de pasar por la ciudad *S*, es conveniente dirigirse hacia *T*. También, podría ser el caso que, si aparecen juntas *P* y *Q*, entonces no aparecen seguidas de *R* y *S*. Estas asociaciones de ciudades representan módulos que pueden servir para “ensamblar” soluciones más complejas, tal y como hacemos con algunos bloques en el juego de Lego, donde ensamblamos un módulo que luego utilizamos como componente para un diseño más elaborado.

Los algoritmos genéticos representan un parteaguas de la ciencia de la computación, porque ofrecieron una poderosa herramienta para abordar de manera efectiva problemas muy costosos. Por otro lado, desde un punto de vista epistemológico, nos ofrecen una ventana para estudiar, desde una nueva perspectiva, los mecanismos que subyacen en muchos fenómenos biológicos.

Sin embargo, la repercusión de mayor alcance de los algoritmos genéticos es que nos llevaron a formularnos nuevas preguntas acerca de la evolución: ¿será acaso que la evolución podría actuar fuera de los sistemas biológicos? Hoy se acepta que la evolución es una heurística muy efectiva para desarrollar soluciones a problemas complejos. Richard Dawkins, por ejemplo, considera que la cultura es el resultado de un proceso evolutivo en cuya base se encuentran un conjunto de entidades conceptuales llamadas *memes*, que son el análogo cultural de los genes biológicos. Eric Beinhocker, por su parte, considera que la economía puede entenderse como un sistema cuyas unidades, o entidades básicas, son los módulos de los planes de negocios.

OTRAS RECETAS PARA VIAJAR CON UNA CARTERA PEQUEÑA

Tenemos que admitir que nos hemos concentrado en la evolución porque es una teoría atractiva que inspira otros temas que se abordan en este libro. En particular, en la ciencia de la computación, la evolución ha inspirado el desarrollo de algoritmos que, además de operar y ensayar permutaciones de símbolos, también puede servir para desarrollar procedimientos de decisión.

Sin embargo, también debemos reconocer que existen muchas otras técnicas heurísticas, inspiradas en situaciones tomadas de la biología o de otras áreas del conocimiento, y que en la práctica han demostrado su eficacia para abordar problemas típicos pertenecientes a la familia de problemas del agente viajero. La mayoría de las heurísticas sustentan su efectividad (en cuanto a “atacar” y resolver un problema) en la posibilidad de probar y evaluar varias soluciones en forma simultánea. Esta es la razón por la que estos enfoques han florecido con el desarrollo de la computación paralela y distribuida, pues, en muchos casos, se requiere ensayar un grupo masivo de individuos (posibles soluciones) que, poco a poco, se van acercando a la solución óptima. Estamos hablando de técnicas como la de *colonia de hormigas* (*Ant Colony Optimization*) y el *enjambre de partículas* (*Particle Swarm Optimization*), entre otras.

En todas estas metodologías subyace un nuevo conjunto de ideas que les dan sustento. Desde finales del siglo pasado han surgido una serie de modelos y herramientas muy eficaces para abordar problemas de diferentes dominios de conocimiento, tales como la física, la biología o la economía. Los objetos estudiados por este nuevo cuerpo de conocimiento se conocen de manera general como sistemas complejos.

M. Mitchell propone que un sistema complejo se forma con un número masivo de entidades o componentes que interactúan sin la mediación de un control central, tan sólo siguiendo un sencillo conjunto de reglas operacionales con las que, sin embargo, logran un comportamiento colectivo muy elaborado. Este comportamiento resultante o *emergente* es el resultado del procesamiento de la información y la adaptación, con base en el aprendizaje y la adaptación o la evolución.

De inmediato, podemos reconocer a muchos sistemas auto-organizados que empatan con la definición anterior. Por ejemplo, las colonias de hormigas, los bancos de peces, el tráfico vehicular, etc. Sabemos que ninguno de ellos obedece a un control centralizado. Decimos, en cambio, que las interacciones entre sus componentes ocurren a un nivel microscópico. Sin embargo, a un nivel macroscópico, todos ellos muestran un comportamiento o patrones (estructuras emergentes) capaces de adaptarse a los cambios a lo largo del tiempo.

Entonces, descubrimos que muchos de los métodos heurísticos, con los que se han abordado los grandes problemas de la computación, están fundamentados en la idea de crear un sistema complejo artificial (agentes virtuales interactuando) que produce, como patrón emergente, la solución (exacta o aproximada) del problema de interés.

Se sabe que las colonias reales de hormigas resuelven el problema de la búsqueda de alimentos y que éste, en efecto, puede modelarse como un problema de optimización combinatoria. Para construir una solución colectiva, cada individuo comunica a los demás el camino que ha seguido, descargando a su paso una sustancia química denominada feromona. Las hormigas tienden a seguir aquellos caminos con más rastros de feromona. Por otro lado, la acción del medio tiende a eliminar o evaporar esta sustancia.

Así, los caminos más largos, de manera natural, tienden a perder su carga de

feromona mientras los más cortos tienden a reforzarla. Al cabo de cierto tiempo, los caminos más cortos entre el nido y las fuentes de alimento se recorren con más y más frecuencia, reforzando el rastro químico. Al final, las hormigas marchan en fila india por el camino más corto, que va de su nido a cada uno de las fuentes de alimento, de ida y vuelta.

EL *jet-set* DE LOS PROBLEMAS DE LA CIENCIA DE LA COMPUTACIÓN

El problema del agente viajero fue definido en el siglo XIX por Hamilton y Kirkman. Se sabe que éste se encuentra detrás de la formulación de varios problemas de logística, manufactura, genética, entre otras posibilidades. Este problema se ha convertido en un *benchmark*, es decir, en un estándar de prueba con el que se verifica el poder de las heurísticas propuestas, así como el poder de las plataformas de cómputo con las que se le enfrenta.

En este sentido, podría decirse que la solución del problema del agente viajero ha alentado el desarrollo de la computación paralela. La Wikipedia reporta que, en 2006, se resolvió una instancia particular de este problema que constaba de alrededor de 86,000 ciudades. Para resolverlo se requirió de una computadora especial cuyo poder de cálculo equivale a varios años de tiempo de procesamiento con computadoras personales (ahora, el equivalente de los monjes serían las computadoras personales). Es decir que, se utilizó una supercomputadora formada por varios procesadores que trabajaron de forma simultánea, ensayando diferentes soluciones del problema o ensamblando soluciones parciales.

Al inicio de este capítulo establecimos que los problemas pueden clasificarse de acuerdo con la cantidad de recursos necesarios para su solución. El costo computacional mide este precio como una función del tamaño del problema. Se dice, por ejemplo, que un cierto algoritmo para ordenar lexicográficamente un conjunto de n palabras, debe realizar una cantidad de comparaciones que crece con el cuadrado de n . También se sabe que hay algoritmos que hacen esta misma tarea con un costo de $n \log n$ (n veces el logaritmo de n), comparaciones que son, computacionalmente hablando, más baratas.

Existen, por otra parte, problemas en los que el costo de su solución crece muy rápidamente conforme crece el tamaño del problema. El problema del agente viajero pertenece esta familia de problemas que, ahora lo podemos decir, se denominan *NP-completos*. Son dos las condiciones que validan la pertenencia al selecto conjunto NP-completo.

Se dice que un problema C es NP-completo si: 1) una posible solución de C puede verificarse (probarse) con un costo, en tiempo, que se expresa como una función polinomial (suma de términos) del tamaño del problema y 2) todo problema de la familia se puede transformar en C , con un costo polinomial. Esto no significa que podamos encontrar esta solución en un tiempo polinomial, sólo significa que podemos probarla en un tiempo polinomial.

Es importante que insistamos en estas propiedades, la primera significa que si nos ofrecieran una lista de ciudades, como una solución para una instancia particu-

lar del problema del agente viajero, podríamos probar, en un tiempo polinomial, si la lista resuelve el problema o no. La segunda propiedad nos dice que si encontráramos un método para resolver exactamente el problema del agente viajero en un tiempo polinomial (lo que se considera el santo grial de la computación), entonces con un ligero costo adicional podríamos resolver cualquier problema de esta familia, porque cualquiera de ellos se puede transformar en C y viceversa. Visto de otra forma, los problemas NP-completos en realidad son un solo monstruo que se presenta bajo diferentes caras.

¿Qué otro problema forma parte de la misteriosa familia de problemas NP completos? Considere el siguiente problema:

El señor Martínez (como siempre, metido en problemas) tiene una mochila que puede cargar hasta K kilogramos. Por otro lado, existe un conjunto de n objetos tales que, cada uno tiene un peso y un valor asociados. Juan Martínez (por fin sabemos cómo se llama) desea guardar en la mochila un subconjunto de tales objetos de manera que se maximice el valor transportado, esto sin exceder la capacidad de carga de la bolsa.

A este problema se le denomina como el *problema de la mochila*. Hay que observar que una solución de fuerza bruta implicaría probar cada uno de los posibles subconjuntos que pueden formarse a partir del conjunto original de n elementos. Se sabe que el total de subconjuntos a probar sería igual a 2^n . Esto significa que la cantidad de posibles combinaciones crece exponencialmente con el tamaño del problema. Esta es la firma distintiva de los problemas a los que hemos llamado *la familia de problemas del agente viajero* y que formalmente se conocen como los problemas NP-completos.

Existen muchos más problemas NP-completos pero, por ahora, podemos concluir diciendo que conocemos métodos exactos y determinísticos para resolver los problemas *sencillos*, en tanto que para resolver los problemas NP-completos hemos tenido que recurrir a heurísticas no determinísticas (dado que en ellas subyacen procesos aleatorios) como, por ejemplo, los algoritmos genéticos, que nos proporcionan soluciones aproximadas pero con costos computacionales bajos y manejables.

BIBLIOGRAFÍA

- Beinhocker, E. D. 2006. *The Origin of Wealth*. Harvard Business School Press.
- Colomi, A., M. Dorigo and V. Maniezzo. 1991. "Distributed optimization by ant colonies". En *Conférence européenne sur la vie artificielle*, pp. 134–142.
- Darwin, C. 2012. *El origen de las especies*. EDAF.
- Dawkins, R. 2002. *El gen egoísta: las bases biológicas de nuestra conducta*. Salvat Ciencia.
- Dorigo, M. and L. M. Gambardella. 1997. "Ant colony system : A cooperative learning approach to the traveling salesman problem". *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1(1):56–66.
- Dorigo, M. and T. Stützle. 2009. Ant colony optimization: Overview and recent advances. Technical report, IRIDIA.
- Garey, M. R. and D. S. Johnson. 1979. *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. W. H. Freeman.
- Gould, S. J. 2004. *La estructura de la teoría de la evolución*. Tusquets Editores, Metatemas.
- Holland, John H. 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. The University of Michigan.
- Kennedy, J. and R. Eberhart. 1995. "Particle swarm optimization". En *IEEE International Conference on Neural Networks*, volume IV, pp. 1942–1948.
- Mitchell, Melanie. 2011. *Complexity: A Guided Tour*. Oxford University Press.
- Shi, Y. and R. Eberhart. 1998. "A modified particle swarm optimizer". En *IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, pp. 69–73.

EVOLUCIÓN Y ALGORITMOS GENÉTICOS: ORÍGENES, PRECURSORES Y APLICACIÓN

Gerardo A. Laguna[‡]
Nareli Cruz-Cortés[§]

Contexto y contingencia no están simplemente en los detalles, contexto y contingencia son la esencia.

Richard C. Lewontin

* * *

EL esfuerzo de algunos reconocidos investigadores, intrigados por las características auto-replicantes de los seres vivos y sus posibles aplicaciones tecnológicas, dio origen a desarrollos teóricos y computacionales para tratar de emular comportamientos análogos en máquinas y, a la postre, ha producido el surgimiento de una de las áreas más interesantes de la ciencia: la inteligencia computacional. En este capítulo haremos una breve reseña de los principales personajes e ideas que participaron en la gestación de este campo del conocimiento que incluye tanto conceptos de la evolución y adaptación darwiniana, como programación computacional y una buena dosis de matemáticas aplicadas.

EL GENIAL «JOHNNY» VON NEUMANN

El 28 de diciembre de 1903 nació en Budapest, Hungría, una de las mentes más brillantes del siglo XX: John von Neumann. Fue un niño prodigio que a los seis años ya realizaba mentalmente divisiones con números de ocho dígitos. Naturalmente que a esa edad, con inocencia, suponía que todo mundo lo podía hacer. Se cuenta que en alguna ocasión que su madre se posó frente a él con la mirada perdida, el niño le preguntó: “¿Qué es lo que calculas má?” Con la misma facilidad que realizaba intrincados cálculos, también hablaba griego antiguo con su padre.

A los 18 años inició sus estudios universitarios en Budapest, para luego continuarlos en Alemania y Suiza. Inició con estudios de química pero su fascinación por las matemáticas nunca lo abandonó. Finalmente se doctoró, a los 23 años, en

[‡] Departamento de Sistemas de Información y Comunicaciones, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Lerma. / g.laguna@correo.ler.uam.mx

[§] Laboratorio de Ciberseguridad, Centro de Investigación en Computación, del Instituto Politécnico Nacional. / nareli@cic.ipn.mx

matemáticas, con un trabajo en el que realizó aportaciones al campo de la lógica matemática y de la mecánica cuántica. Su trabajo le mereció obtener una posición como profesor, nada menos junto a personajes como Einstein y Gödel, en el prestigioso Instituto de Estudios Avanzados (IAS, por sus siglas en inglés) en Princeton.

Hasta su muerte trabajó en el IAS y produjo aportaciones fundamentales en las matemáticas, la física, la ciencia computacional, la economía, la biología y las neurociencias. Sólo por mencionar las más importantes, concibió la teoría de juegos en un artículo que ha sido considerado como uno de los más importantes trabajos de las matemáticas aplicadas a las ciencias económicas. Diseñó la arquitectura de la primera computadora programable, haciendo realidad el sueño de Charles Babbage (1791-1871) con la computadora EDVAC, cuya memoria técnica se considera como el documento *parteaguas* en la ciencia de la computación. Sus contribuciones para la realización de la bomba atómica y de hidrógeno fueron decisivas. También tuvo un activa participación política con una postura conservadora y fue consejero científico de la presidencia de los Estados Unidos.

Su predilección por la construcción de máquinas, el ruido que producían y las frecuentes visitas de colaboradores de las más diversas disciplinas, le granjearon la antipatía de los colegas del IAS que, en su mayoría, eran esencialmente teóricos ortodoxos. Sus detractores comentaban con sarcasmo que en la Facultad de Matemáticas del IAS existían tres grupos: “uno conformado por matemáticos puros, otro conformado por físicos teóricos y uno más conformado por el profesor von Neumann”. Aunque sea difícil de creer, a la muerte de von Neumann, el IAS canceló el proyecto de cómputo y toda posibilidad de ciencia aplicada o laboratorio experimental. No tenían idea de la transformación que sufriría la ciencia muy poco tiempo después, particularmente la física, gracias a la tecnología computacional desarrollada a partir de los aportes de von Neumann.

De todas sus importantes contribuciones a la ciencia, aquí nos centraremos en sus investigaciones respecto de los autómatas auto-replicantes y las posibles relaciones entre la lógica de las computadoras y el funcionamiento del cerebro. Von Neumann intentaba desarrollar una teoría general sobre el procesamiento de la información, que pretendía incluir tanto a la biología como a la tecnología. Su relación fue muy cercana con el grupo de investigadores que trabajaban en el campo de la cibernética, buscando cosas en común en los sistemas que denominó *complejos adaptables*, tanto en lo real como en lo artificial.

El autómata de von Neumann, descrito sólo en forma matemática, incluía mecanismos para auto-replicar su código de programa así como para la interpretación del mismo. Se trataba, en realidad, de una abstracción para una máquina auto-replicante. Lo impresionante es que su teoría se formuló en la década de 1950, cuando no se tenía una idea clara de cómo funcionaba el mecanismo auto-replicante de los seres vivos a nivel genético. Estuvo a punto de concluir la demostración matemática de la validez del modelo para su autómata cuando, muy a su pesar, la muerte por cáncer lo sorprendió a los 53 años (en el lecho de muerte gritaba que era muy joven para morir). Sin embargo, la demostración fue completada por su alumno y colega Arthur Burks y, finalmente, publicada en el libro *Theory of*

Self-Reproducing Automata de Burks, en 1966.

Con este trabajo, von Neumann demostraba que, en principio, la auto-réplica de una máquina era posible mediante la lógica propuesta y que ello podría tener similitudes con los mecanismos de los sistemas vivos.

JOHN HOLLAND Y LOS PROGRAMAS QUE «EVOLUCIONAN»

Von Neumann había dado el primer paso con la concepción de la auto-réplica, ya sea de una máquina o de un programa. El siguiente paso, emulando a los seres vivos, era introducir alguna mutación en estos autómatas para generar, eventualmente y en forma contingente, alguna mejora que les permitiera sobrevivir en un medio competitivo. Es decir, hacía falta dar el siguiente paso para que los autómatas de von Neumann evolucionaran y se adaptaran. Ese paso lo dio el científico estadounidense John Henry Holland (1929-2015) entre las décadas de 1960 y 1970.

Con ello surgió también el campo de la computación que investiga los efectos y aplicaciones de la inclusión de mecanismos evolutivos, en el sentido darwiniano, dentro de programas de computadora, y que se conoce, en lo general, como *computación evolutiva*. Varios grupos iniciaron sus investigaciones sobre esta temática en la década de 1960 y el grupo encabezado por Holland es, sin duda, el más representativo de todos ellos.

Dado que la investigación doctoral de Holland fue asesorada por Burks, se puede decir que Holland es heredero intelectual, en línea directa, de von Neumann. Holland originalmente había iniciado su doctorado en matemáticas, pero terminó cambiándose al programa de doctorado en ciencias de la computación y las comunicaciones. Fue pionero en ello porque, al graduarse, se convirtió en el primer doctor, a nivel mundial, en ciencias de la computación.

Holland se concentró en la modelación por computadora de lo que él pensaba era la clave de la auto-organización: la adaptación. Así, en su libro *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, publicado en 1975, sienta las bases de lo que hoy se conoce como los *algoritmos genéticos* o AG, por sus siglas.

EL ALGORITMO GENÉTICO: 1A. APROXIMACIÓN

Un algoritmo puede entenderse como una serie de pasos para resolver algo. Holland propuso un algoritmo para resolver cierta clase de problemas mediante la *evolución* de un conjunto (población) de diversas y posibles soluciones (individuos) para el mismo. El proceso propuesto para la evolución y mejora para las posibles soluciones se realizaría por aproximaciones sucesivas. Cada aproximación resulta de una iteración del algoritmo (una ejecución de todos sus pasos), de tal manera que cada vez que se repite la ejecución del algoritmo existe la posibilidad de que aparezcan mejores soluciones para el problema.

Como los mecanismos que propuso Holland para generar posibles mejoras de las soluciones se inspiran en las mutaciones genéticas de los seres vivos, y en el

proceso de selección natural considerados por la teoría neodarwinista de la evolución de las especies, al algoritmo de Holland se le ha denominado como *genético*. Por estas mismas razones, siguiendo la analogía con los seres vivos, a cada posible solución se le considera como un individuo de la población y a cada iteración del algoritmo se le llama *generación*.

Naturalmente, dado el gusto de Holland y de sus ascendientes académicos por las matemáticas, el problema que se trata de resolver debe tener asociada una función de costo o función objetivo que permita determinar, de manera cuantitativa, si una solución es mejor que otra. A esta función matemática se le denomina, en la jerga de los AG, como función de *aptitud*.

Cada posible solución, o individuo, se representa mediante una cadena de bits, números o símbolos. Estas cadenas pueden ser vistas como la representación computacional del *genotipo* del individuo y, por lo tanto, pueden ser sujetas de mecanismos de mutación. Dado que la aptitud del individuo se asume como una función que depende de la cadena (genotipo), podemos entender a la aptitud como el *fenotipo* del individuo.

Veamos cuál es la estructura del algoritmo genético de Holland:

1. Inicialización. Generar en forma aleatoria una población inicial de individuos (cadenas de bits que representan a las posibles soluciones).
2. Manifestación de fenotipos. Calcular la aptitud de cada individuo en la generación actual.
3. Selección de padres. Seleccionar algunos individuos (*padres*), asignando mayor probabilidad de ser elegidos a aquellos individuos con las mejores aptitudes, para generar nuevos individuos a partir de ellos.
4. Cruza. Recombinar (cruzar) las cadenas de los padres para producir nuevos individuos.
5. Mutación. Eventualmente modificar, en forma aleatoria, algunos bits de las cadenas de los nuevos individuos. Específicamente, la mutación consiste en introducir, con una probabilidad baja, cambios aleatorios en los bits que conforman a los individuos. Con ello se espera que alguno de dichos cambios resulte en una mejora de la aptitud del individuo.
6. Regeneración. Mediante cruza y mutación, producir una población del mismo tamaño a la original. Entonces, la nueva población reemplaza a la anterior. Luego, regresar al paso 2.

El algoritmo se repite por un número determinado de veces o hasta que ya no se obtienen mejoras sustanciales en las soluciones generadas. La salida que arroja este algoritmo es aquel individuo cuyo valor de aptitud sea el mejor de todas las generaciones.

Ahora repasemos, de manera general, el propósito de cada paso (en la última sección de este capítulo se incluyen los detalles para el lector más especializado).

Para empezar, la población inicial se constituye totalmente por individuos solución cuyas cadenas se construyen totalmente en forma aleatoria. La selección de los padres se realiza en forma aleatoria pero asignando una probabilidad, para ser elegido, que sea proporcional a la aptitud del individuo. Entonces, los individuos con mayor aptitud tendrán una mayor probabilidad de ser elegidos como padres. Por el contrario, los individuos con menor aptitud, tendrán una menor probabilidad de ser elegidos como padres, no obstante, existe la posibilidad de ser elegidos.

La recombinación o cruce está totalmente inspirada en el intercambio de segmentos de las cadenas genéticas en la reproducción de los seres vivos. En un algoritmo genético, para realizar una recombinación, simplemente se toman dos cadenas padres y se elige, al menos, un punto de corte para seccionar a ambas cadenas. Los segmentos resultantes del corte se intercambian para construir con ellos dos nuevas cadenas diferentes a las de los padres.

La mutación consiste en que, durante el proceso de recombinación, para cada uno de los nuevos individuos, existe la posibilidad, aunque con una probabilidad relativamente pequeña, de que en su cadena se modifique alguno de sus elementos en forma aleatoria.

LA EFECTIVIDAD DE LOS AG PARA RESOLVER PROBLEMAS DEL MUNDO REAL

El algoritmo genético es sorprendentemente simple y, no obstante, se emplea en la vida real para resolver problemas de gran complejidad. En general, podemos definir a estos algoritmos como heurísticas para la exploración en espacios de búsqueda.¹ Una heurística no es más que una regla obtenida en forma empírica (por *ensayo y error*) para la resolución de un problema. Esta aparente falta de *rigor* en la búsqueda de soluciones tiene su justificación en el hecho de que existen problemas donde la cantidad de variables involucradas hace prácticamente imposible una prueba rigurosa de *todas* las posibles soluciones en un tiempo corto. Por el contrario, las heurísticas pueden proporcionar una buena solución en un tiempo razonable, aunque no necesariamente la óptima.

Lo anterior es la razón por la que en algunos campos de la ciencia y de la industria (incluyendo a la *National Aeronautics and Space Administration*, NASA) se ha recurrido, con resultados muy buenos, a heurísticas bioinspiradas (como los AG) para la solución práctica de algunos problemas muy complejos. Y esto, muy a pesar de la reticencia y oposición de algunos investigadores teóricos muy ortodoxos (recordemos a los colegas del von Neumann en el IAS) para los que esta clase de soluciones *no rigurosas* son verdaderas *aberraciones* dentro de la ciencia.

LA CLAVE DETRÁS DE LOS AG

Podemos decir que, parafraseando a Richard C. Lewontin, el truco detrás de la efectividad los AG está en la conjunción de “contexto y contingencia”. Veamos, en el algoritmo genético podemos detectar dos clases de operaciones:

¹ En optimización, *espacio de búsqueda* se refiere al dominio de la función a ser optimizada.

1. Explotación. Que es el caso de las operaciones de selección y recombinación. Son operaciones de explotación porque buscan sacar el máximo provecho a soluciones que han probado ser buenas. Es decir tratan de aprovechar al máximo el *contexto*, lo conocido.
2. Exploración. Es el caso de la operación de mutación. La mutación es una operación de exploración porque permite lanzarse a *lo desconocido*, dando la oportunidad de probar con nuevas alternativas de solución. Es decir, genera innovación mediante la *contingencia*, lo inesperado, el azar.

En efecto, comprobamos que para la innovación son condiciones necesarias tanto el contexto, como la contingencia.

CAMPOS AFINES A LOS AG

Hoy en día, los AG y la inteligencia computacional son áreas de investigación muy activas, con una considerable producción de artículos y realización de congresos. En la actualidad se conoce con el nombre de *cómputo evolutivo* a la familia de algoritmos inspirados por los mismos procesos de selección y supervivencia de los individuos más aptos, tales como las *estrategias evolutivas*, la *programación evolutiva*, la *programación genética* y, desde luego, los algoritmos genéticos, cuya principal diferencia es la manera en que se representa a los individuos, al menos en sus concepciones originales.

Finalmente, comentaremos que la computación evolutiva, a su vez, forma parte de lo que hoy se conoce como *inteligencia computacional*, que además agrupa, entre otros, a los siguientes campos de estudio:

- Algoritmos de optimización por enjambres de partículas
- Algoritmos de optimización por colonia de hormigas
- Inteligencia de agentes
- Redes neuronales artificiales
- Lógica difusa

EJEMPLO PRÁCTICO DE UN ALGORITMO GENÉTICO

Para finalizar, mostraremos un ejemplo simple de un algoritmo genético. Se mostrará la esencia de los operadores de recombinación, cruza y mutación, y la forma de representar una secuencia de genes como una cadena de bits. Esta sección, aunque no requiere más requisito de matemáticas que elementos de aritmética y álgebra básica, puede ser omitida por el lector que no esté interesado en conocer los detalles de programación. Se incluye para aquellos lectores un poco más especializados que pudieran estar interesados en la programación de un algoritmo genético.

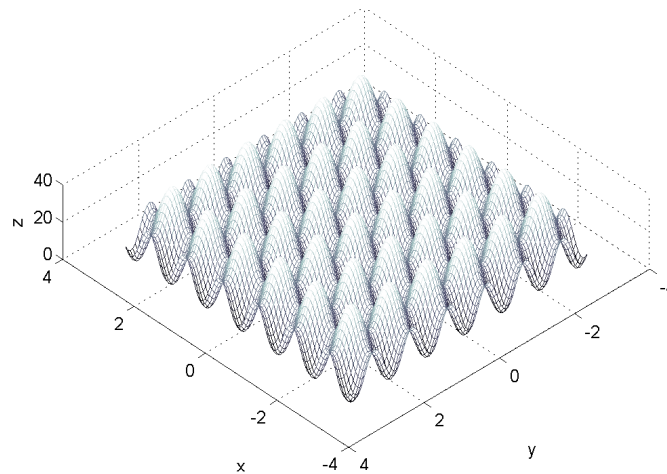


Figura 1: Función de costo del tipo Rastrigin, $z = f(x, y)$

Un problema típico de optimización

Las funciones matemáticas nos permiten representar la interdependencia entre variables. Si una variable se puede expresar en términos de otras, entonces se dice que la primera es función de las demás. Por ejemplo, podemos tener un caso en el que el costo de producir algún objeto esté en función de dos variables, digamos x y y . Si al costo lo denotamos por la variable z , entonces podemos afirmar que el costo z es una función de x y y , es decir, más formalmente $z = f(x, y)$. Ahora, supongamos que un equipo de ingenieros de producción ha estimado que la función de costo es un caso particular de un modelo que se denomina como función de Rastrigin, a saber:

$$z = x^2 - 10 \cos(2\pi x) + y^2 - 10 \cos(2\pi y) + 20,$$

donde los valores para x y para y se encuentran en el intervalo entre -5.0 y 5.0 . Dado que z es una función de únicamente dos variable, entonces se trata de una superficie y la podemos graficar para visualizarla. En la figura 1 podemos observar el tipo de superficie de la que estamos hablando cuando nos referimos a un comportamiento del tipo Rastrigin. Se trata de una superficie similar a un cartón de embalaje (empaquete) para huevos.

Ocurre que esta superficie tiene un punto donde su altura es mínima respecto de todos los demás y que, intuitivamente, suponemos se encuentra en alguna de las concavidades de la misma. El problema de optimización, en este caso, supone la minimización del costo, es decir la búsqueda del punto con coordenadas (x, y) donde la función z alcanza su punto más bajo.

Vamos a emplear este problema de optimización para mostrar la aplicación de un algoritmo genético que se encargue de realizar automáticamente la exploración de la superficie tipo Rastrigin (espacio de búsqueda) a fin de encontrar una solución muy cercana a la solución óptima.

Identificación de los individuos y codificación de valores

Lo primero que necesitamos es identificar a los individuos de nuestra población que vamos a evolucionar. Si decidimos que un par de coordenadas del espacio de búsqueda es un individuo, entonces, de lo que se trata es de encontrar al mejor individuo, es decir, el par de coordenadas que minimiza la función de costo z . Como el principio de evolución neodarwinista supone la supervivencia de los mejores individuos en cada generación, nosotros vamos a tomar una población inicial de posibles soluciones (individuos con coordenadas (x, y)) y la vamos a evolucionar mediante los operadores de recombinación, cruza y mutación de sus genotipos a fin de conseguir al mejor individuo.

El siguiente punto importante es definir cómo vamos a representar al genotipo de cada individuo. Los algoritmos son programas de computadora, por lo tanto, nos conviene usar una representación *natural* para la computadora. Por todo lo anterior, optaremos por secuencias de bits (ceros y unos) para representar las cadenas de *genes* de nuestros individuos.

Entonces, la cadena de genes se compone por la concatenación de las representaciones binarias (secuencias o cadenas de bits) para cada una de las variables del vector solución. En nuestro ejemplo, el vector solución lo componen las dos variables de la pareja coordenada (x, y) , así que el genotipo será la concatenación de dos secuencias binarias: una para codificar el valor de x y otra para codificar el valor de y .

Para codificar el valor de cada variable como secuencia de bits, vamos a emplear las siguientes reglas:

1. Determinación del tamaño (la longitud) de la cadena de bits para codificar los posibles valores de cada variable. El número de bits de nuestras secuencias lo vamos a determinar mediante la siguiente expresión:

$$n = \text{ceil}(\log_2[(b - a) \times 10^d])$$

donde n es el número de bits de nuestra secuencia, b es el valor máximo que pueden tomar nuestras variables independientes x y y , a es el valor mínimo que pueden tomar y d es el número de cifras decimales de precisión que queremos. El operador $\text{ceil}(\ast)$ indica que sólo nos interesa el número entero (sin fracciones decimales) del resultado redondeado hacia arriba,² mientras

² Se requieren números enteros porque son los que podemos representar de manera natural con las cadenas de bits. Por otro lado, se redondea cualquier número fraccionario hacia arriba a fin de garantizar que el intervalo de representación numérica incluya una holgura suficiente.

que el operador $\log_2(*)$, es decir, logaritmo de base 2, puede calcularse mediante

$$\log_2(x) = \frac{\ln(x)}{\ln(2)}$$

donde $\ln(*)$ es un logaritmo natural o neperiano.³

Por ejemplo, en nuestro caso, sabemos que el valor máximo de las variables independientes es 5.0 y el mínimo es -5.0, por lo tanto $b = 5.0$ y $a = -5.0$. Si especificamos que trabajaremos con una precisión de dos cifras decimales, entonces $d = 2$. Con estas especificaciones, podemos calcular la longitud en bits de nuestras secuencias:

$$\begin{aligned} n &= \text{ceil}(\log_2[(b - a) \times 10^d]) = \text{ceil}(\log_2[(5.0 - (-5.0)) \times 10^2]) \\ &= \text{ceil}\left(\frac{\ln[10 \times 10^2]}{\ln(2)}\right) = \text{ceil}(9.96) = 10 \end{aligned}$$

Es decir, la secuencia binaria para representar a cada valor de nuestro par coordenado será de 10 bits.

2. Codificación de los valores. Para codificar cualquier valor decimal, v , del intervalo $[a, b]$, con hasta d cifras fraccionarias, mediante un número entero i (que, a su vez, representaremos con una secuencia binaria de n bits) empleamos la siguiente expresión:

$$i = (v - a)10^d \quad a \leq v \leq b$$

En forma correspondiente, para recuperar el valor decimal, v , partiendo del número entero, i , que lo codifica, usamos la expresión:

$$v = a + \frac{i}{10^d} \quad 0 \leq i < 2^n$$

Por ejemplo, si necesitamos representar el valor 3.75, que se encuentra en el intervalo $[-5.0, 5.0]$, sabiendo que usaremos 2 cifras fraccionarias, hacemos:

$$\begin{aligned} i &= (v - a)10^d \\ i &= (3.75 - (-5.0))10^2 \\ &= 8.75 \times 100 = 875 \end{aligned}$$

Ahora hagamos el proceso contrario, decodifiquemos el entero 875:

$$\begin{aligned} v &= a + \frac{i}{10^d} \\ &= (-5.0) + \frac{875}{10^2} \\ &= (-5.0) + 8.75 = 3.75 \end{aligned}$$

³ Aquí usamos el logaritmo natural pero, en realidad, puede usarse el logaritmo de cualquier otra base, siempre que se use el mismo en el numerador y en el denominador.

Ahora estamos listos para la representación de los genotipos.

Es importante comentar que aunque aquí hemos ejemplificado el uso de las expresiones para codificar valores reales como secuencias binarias y decodificar secuencias binarias a sus valores correspondientes, en la práctica, el algoritmo genético únicamente emplea la expresión de decodificación, ya que se parte directamente de una población inicial de secuencias binarias aleatorias. Esto debido a que es ocioso generar valores aleatorios para pasarlos a una secuencia binaria, que también es aleatoria. Entonces, se ahorra tiempo computacional generando directamente la población inicial con secuencias aleatorias de bits del tamaño requerido.

Representación de genotipos

Ya comentamos que la representación más conveniente de una cadena de genes dentro de la computadora es mediante una cadena de bits. En nuestro problema de optimización de ejemplo, hemos determinado que cada individuo represente a un punto dentro del espacio de búsqueda, es decir un par coordinado. Entonces, si tenemos a un individuo, identificado por el índice i , este corresponde a las coordenadas (x_i, y_i) .

Después de codificar a cada valor de la coordenada con un número entero, de acuerdo a la metodología de la sección anterior, sólo nos resta expresar cada valor entero como un número binario. Entonces, podemos proponer que la cadena que representa al genotipo de un individuo sea simplemente la concatenación (en cadenamiento) de los dos números binarios correspondientes al par coordinado. Si sabemos que cada secuencia binaria tiene una longitud n , entonces la longitud total de cada genotipo será de $2n$.

Por ejemplo, considere el caso del punto con coordenadas $(3.75, 3.75)$. Este punto del espacio de búsqueda es un candidato de solución y, por lo tanto, un individuo de nuestra población a evolucionar. Tomando las mismas especificaciones de representación entera de nuestros posibles valores, es decir, para el intervalo $[-5.0, 5.0]$ con hasta 2 cifras fraccionarias, tenemos que este par coordinado se codificaría como el par de enteros $(875, 875)$. Su representación como números binarios de 10 bits, siguiendo el método convencional, sería $(1101101011_b, 1101101011_b)$. Se puede comprobar que el número binario 1101101011_b es igual al entero decimal 875, de una manera simple y directa. Recordando que los números binarios se representan en un sistema posicional con base 2, tenemos:

$$\begin{aligned} 1101101011_b &= 1 \times 2^9 + 1 \times 2^8 + 0 \times 2^7 + 1 \times 2^6 + 1 \times 2^5 + 0 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 \\ &= 1 \times 512 + 1 \times 256 + 0 \times 128 + 1 \times 64 + 1 \times 32 + 0 \times 16 + 1 \times 8 + 0 \times 4 + 1 \times 2 + 1 \times 1 \\ &= 512 + 256 + 64 + 32 + 8 + 2 + 1 = 875 \end{aligned}$$

Ahora, lo único que nos resta es concatenar los números binarios del par coordinado para tener una sola cadena que represente al genotipo de nuestro individuo $(3.75, 3.75)$, a saber:

$$[11011010111101101011]$$

que es una cadena de $2 \times 10 = 20$ bits, tal y como lo habíamos previsto.

Cálculo de aptitud

Una forma de calcular la aptitud de nuestros individuos es mediante una valuación directa de la función de costo. La aptitud de un individuo, como se mencionó antes, se refiere al valor numérico que se le asigna a éste y que indica qué tan bien resuelve el problema dado. En nuestro ejemplo el problema es encontrar la pareja de variables que tiene un valor mínimo para la función Rastring (ilustrada en la figura 1). De manera que asignaremos a cada individuo un valor de aptitud de acuerdo a la evaluación de las variables que representa en la función de Rastring. Así, para nuestro individuo de ejemplo (3.75,3.75) su valor de aptitud $A(x, y)$ correspondiente es:

$$\begin{aligned}
 A(3.75, 3.75) &= z(3.75, 3.75) = \\
 &= (3.75)^2 - 10 \cos(2\pi * 3.75) + (3.75)^2 - 10 \cos(2\pi * 3.75) + 20 \\
 &= (3.75)^2 - 10 \cos(23.56) + (3.75)^2 - 10 \cos(23.56) + 20 \\
 &= (3.75)^2 - 10 * 0.916 + (3.75)^2 - 10 * 0.916 + 20 \\
 &= (3.75)^2 - 9.16 + (3.75)^2 - 9.16 + 20 \\
 &= 14.06 - 9.25 + 14.06 - 9.25 + 20 \\
 &= 29.62
 \end{aligned}$$

Entonces, dada esta definición para la aptitud, aquellos individuos que tengan valores de aptitud *menores* serán los mejores para resolver este problema. Por lo tanto, la aptitud A para el i -ésimo individuo la denotaremos como:

$$A_i = z(x_i, y_i)$$

Así las cosas, querer encontrar al individuo que minimice la función de costo z equivale a encontrar un individuo con mínima aptitud.

Por supuesto, para calcular la aptitud, es necesario decodificar las cadenas con el genotipo o par coordenado, primero, del par de números binarios hacia un par de enteros decimales y, finalmente, decodificando el par de enteros decimales a su equivalente como números reales (números con fracciones, en el intervalo especificado).

Selección y cruza

Para elegir a los padres de un par de nuevos individuos de la siguiente generación, procedemos a elegir dos de la generación actual, mediante un procedimiento

aleatorio, donde la probabilidad de que un individuo dado sea elegido es proporcional⁴ a la aptitud del mismo respecto de la suma de todas las aptitudes. En este proceso se debe garantizar que todos los individuos tienen la posibilidad de ser elegidos, por mínima que sea su probabilidad. Esto puede resolverse mediante una técnica análoga a una ruleta, donde se reparte el perímetro de la ruleta entre todos los individuos participantes, asignando arcos de dimensión proporcional a la aptitud. Así, cuando se gira la ruleta, el individuo con mayor aptitud tiene mayor probabilidad de ser elegido, dada la mayor proporción de su arco, pero ello no impide que pueda resultar electo el individuo de menor aptitud y, por cierto, con menor probabilidad.

Como, en principio, se trata de remplazar a toda la generación actual con nuevos individuos y dado que cada pareja de padres engendrará a un par de nuevos individuos, la elección de parejas de padres se repite, como máximo, tantas veces como la mitad del número de individuos actuales. Esto quiere decir que, por ejemplo, si nuestra población se compone de 100 individuos, para la generación de los nuevos 100 individuos, se recurre al procedimiento de elección de parejas de padres, exactamente 50 veces.

Entonces, una vez que contamos con una pareja de padres para un nuevo par de individuos, tomamos sus cadenas de genes y los recombinamos empleando alguna técnica de punto o puntos de cruce. La idea es simple: en forma aleatoria se elige algún punto de la cadena de bits y se toma como punto de cruce. Usando el mismo punto de cruce para las dos cadenas, se fragmentan y se procede a intercambiar sus contenidos, la una con la otra. Por ejemplo, considere las siguientes cadenas genotípicas de un par de padres:

[100110010100110010] y [110111010110111111]

Ahora supongamos que después de elegir un punto de cruce en forma aleatoria resulta la siguiente recombinación (ver Figura 2), donde la marca (\wedge) indica el punto de cruce.

En este ejemplo, de la cruce y recombinación de los padres indicados, resultan los siguientes nuevos individuos:

[10011001010011111111] y [11011101011011001010]

Por lo tanto, por cada pareja de padres se tiene una descendencia de 2 nuevos individuos que pueden o no sufrir una mutación, como veremos a continuación.

Mutación

La operación de mutación se intenta para cada bit de la cadena binaria, en todos los nuevos individuos, conforme a una cierta probabilidad que normalmente es $1/L$, donde L es la longitud de la cadena binaria. Se recorre la cadena binaria y, para

⁴ En nuestro ejemplo, la probabilidad es inversamente proporcional al valor de la aptitud, dado que el mejor individuo es aquel con la menor aptitud.

Punto de cruce:

[10011001010011001010]
 ^
 [11011101011011111111]
 ^

Recombinación:

[10011001010011111111]
 ^
 [11011101011011001010]
 ^

Figura 2: Ejemplo de cruce

Punto de mutación:

[10011001010011111111]
 ^

Cadena mutada:

[10011011010011111111]
 ^

Figura 3: Mutación

cada bit, se aplica la operación de mutación. De darse, la operación de mutación consiste en complementar lógicamente al bit en turno, pasando de uno a cero, si originalmente se estaba en uno, o de cero a uno, si originalmente se estaba en cero.

Por ejemplo, considere el primero de los nuevos individuos de la figura 2. Ahora, supongamos que sólo uno de los bits resultó mutado, tal y como se muestra en la figura 3, donde la marca (^) indica el punto de mutación.

Reemplazo de la generación anterior por la nueva

Una vez que se tiene a la descendencia, se procede a reemplazar a toda la generación anterior por la nueva. En este punto se supone que pueden surgir individuos con mejores aptitudes respecto de la generación anterior. Sin embargo, esto no necesariamente ocurre siempre. Por ello, existe una modalidad de reemplazo de la

generación que se denomina *con elitismo*, y consiste en remplazar a todos los individuos de la generación anterior con excepción del mejor de todos, que pasa a la siguiente generación ocupando el lugar del peor individuo de la misma.

Algoritmo genético: 2a. aproximación

Entonces, dada una cierta población aleatoria de individuos iniciales, el algoritmo genético no es más que la iteración de los siguientes pasos:

1. cálculo de la aptitud de los individuos,
2. selección de padres,
3. cruza seguida de mutación, y
4. reemplazo de generación anterior por la nueva.

Se repiten estos pasos mientras no se cumpla la condición de terminación. Ésta puede ser un cierto número de iteraciones (generaciones) o, incluso, se puede parar cuando ya no se note un cambio significativo entre los mejores individuos de cierto número de generaciones consecutivas.

Para nuestro ejemplo, con una función de costo del tipo Rastrigin, esperamos que el algoritmo genético encuentre una solución para el problema de minimización del costo que, en este caso, sabemos de antemano que la solución óptima se encuentra en el punto $(0, 0)$ con valor $z = 0$. No obstante, aunque la población inicial del algoritmo genético “no sabe” de este punto óptimo, tarde o temprano, encontrará una solución muy cercana a la del óptimo real.

Finalmente, y a manera de ejemplo, en la figura 4 se presenta la curva de convergencia típica, durante la evolución del AG con elitismo, para la minimización de una función de Rastrigin de dos variables independientes. Se presenta la curva obtenida en una ejecución del algoritmo con una población de 100 individuos, 1000 generaciones, 4 dígitos decimales de precisión y 10 % de probabilidad de mutación. Nótese cómo, con estos parámetros, el algoritmo converge a una solución muy cercana a la óptima, donde $z \approx 0$, alrededor de la generación 40.

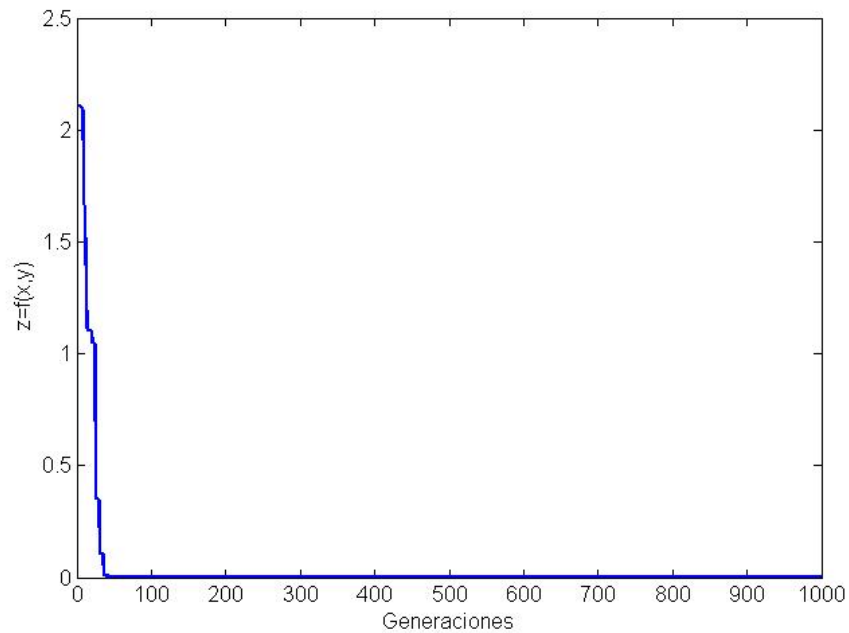


Figura 4: Curva de convergencia típica para un AG, con elitismo, durante su evolución, para minimizar una función de Rastrigin de dos variables, con una población de 100 individuos, una precisión de 4 dígitos decimales y una probabilidad de mutación de 10%.

BIBLIOGRAFÍA

- Coello-Coello, Carlos. 1995. "Introducción a los algoritmos genéticos". *Soluciones Avanzadas. Tecnologías de Información y Estrategias de Negocios*, (17):5-11, enero.
- De-Los-Cobos, Sergio, John Goddard-Close, Miguel Gutiérrez Andrade y Alma Martínez-Licona. 2010. *Búsqueda y exploración estocástica*. CBI UAM-Iztapalapa.
- Holland, John. 2004. *El orden oculto: De cómo la adaptación crea la complejidad*. Fondo de Cultura Económica.
- Mitchell, Melanie. 2011. *Complexity: A Guided Tour*. Oxford University Press.

⊙ *Esta es una página en blanco.* ⊙

LA EVOLUCIÓN DE LA COOPERACIÓN... ENTRE COMPUTADORAS

Ricardo Marcelín-Jiménez*

No existe una mejor prueba del progreso de una civilización que la del progreso de la cooperación.

John Stuart Mill

* * *

EN este capítulo describirémos el famoso juego iterativo de los prisioneros, cuyos resultados demuestran que la cooperación es una estrategia razonable aun entre entidades en conflicto, así como la aplicación de este importante resultado en las áreas emergentes de la computación distribuida.

EL DILEMA DE LOS PRISIONEROS

Comencemos por considerar el dilema de la siguiente historia:

A y *B* son dos personajes que han emprendido diferentes aventuras al margen de la ley. No es que siempre trabajen juntos, en realidad se trata de dos personas sin más lealtad que consigo mismas que, si les puede reportar un beneficio, pueden emprender aventuras de riesgo compartido. Luego de su último "golpe", la policía no tiene ninguna evidencia que pueda incriminarlos, pero recibe una denuncia anónima que inculpa a ambos. El inspector *M* decide arrestarlos preventivamente pero les encierra en celdas separadas, sin posibilidad de comunicación. Entonces se entrevista con uno de ellos, digamos *A*, y le explica su condición (imaginemos al viejo policía rudo que toma la silla y se sienta al revés para apoyar los brazos sobre el respaldo, mientras toma un horrible café). – Hijo, la situación es la siguiente: tienes que decidir entre confesar o mantener el pico cerrado y lo mismo va para tu compinche. De manera que pueden presentarse 4 resultados diferentes: i) si tú hablas y el otro también, entonces ambos recibirán 2 años, ii) si tú hablas y el otro no, entonces tú quedarás libre, por cooperar con la justicia, y el otro recibirá la condena máxima de 3 años, iii) si tú no hablas y el otro sí, entonces los castigos se invierten, es decir, tú cargas con la condena máxima de 3 años y el otro queda libre, finalmente, iv) si ninguno habla, ambos recibirán una pena de 1 año por no contar con evidencia en su contra. Piénsatelo bien, la noche es larga y la almohada es buena consejera.

* Departamento de Ingeniería Eléctrica, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. / calu@xanum.uam.mx

	Prisionero B no habla (coopera)	Prisionero B habla (traiciona)
Prisionero A no habla (coopera)	Ambos van a la cárcel por 1 año	Prisionero A: 3 años Prisionero B: libertad
Prisionero A habla (traiciona)	Prisionero A: libertad Prisionero B: 3 años	Ambos van a la cárcel por 2 años

Cuadro 1: Matriz de pagos para el dilema de los prisioneros

Luego, el inspector abandona la celda y repite su explicación al otro prisionero. Esa noche, los prisioneros reflexionan por separado: "Si mi compañero hablara, ¿cuál sería la acción que más me convendría? Si no hablara, ¿cuál sería la acción que más me convendría?" La suerte de los prisioneros está echada.

En la vida de las personas, las organizaciones, los países, existen situaciones en las que se presentan interacciones, entre estas entidades, que ofrecen diferentes beneficios o costos y cuyo resultado depende de la combinación de las decisiones que tomen las partes involucradas. Esto significa que el resultado no depende de una de las partes, sino de la reunión de sus elecciones individuales.

John von Neumann y Oskar Morgenstern, matemático y economista respectivamente, reflexionaron sobre la manera de formalizar este tipo de interacciones y, juntos, desarrollaron la llamada teoría de juegos, que expusieron en su libro *Teoría de juegos y comportamiento económico*. En este contexto, la palabra *juego* pierde su connotación cotidiana. No se refiere al yoyo, las canicas, o el fútbol. Se trata, en cambio, del estudio de objetos matemáticos. Desde esta perspectiva, un juego consiste en un conjunto de entidades denominadas jugadores, un conjunto de movimientos o estrategias, propias de cada jugador, y las especificaciones de pago o beneficio para cada uno de ellos, que depende de cada posible combinación de estrategias.

El dilema de los prisioneros es un problema fundamental de la teoría de juegos que supone que dos personas pueden no cooperar incluso si en ello va el interés de ambas. Fue desarrollado en 1952 por Merrill Flood y Melvin Dresher, pero fue Albert W. Tucker quien lo formalizó y bautizó. Robert Axelrod, matemático y politólogo (extraña combinación), se refiere a este problema como la *Escherichia coli* de la investigación sobre juegos. El investigador hace referencia al hecho de que, en biología, suele recurrirse a este bicho, debido a las facilidades que ofrece como objeto de investigación, siendo un ente pequeño y manejable. De igual forma, el dilema de los prisioneros representa un modelo pequeño y manejable, a partir del cual se pueden estudiar muchos sistemas con el enfoque de la teoría de juegos.

Podemos presentar esquemáticamente el problema de los prisioneros usando la siguiente matriz (cuadro 1), conocida como matriz de pagos: la segunda y tercera fila representan las opciones o estrategias que tiene el jugador A. En tanto, la segunda y tercera columna representan las opciones o estrategias del jugador B. Así, la intersección de una fila con una columna representa el pago o la salida que cada jugador recibe en función de la combinación correspondiente de sus estrategias.

Asumiendo que A y B son jugadores racionales, es decir, que actúan solamen-

	<i>B coopera</i>	<i>B traiciona</i>
A coopera	R,R	S,T
A traiciona	T,S	P,P

Cuadro 2: Matriz canónica de pagos para el dilema de los prisioneros

te pensando en maximizar su beneficio (o minimizar su pérdida), entonces sería interesante “ponerse en los zapatos” de cualquiera de ellos y analizar la situación desde su perspectiva. Supongamos, entonces, que revisamos el problema desde el punto de vista de A, ¿cuál sería su mejor jugada pensando que B cooperara? En este caso, lo que más le convendría sería traicionarlo, porque quedaría en libertad. Ahora bien, ¿cuál sería su mejor jugada pensando que B lo traicionara? En este caso, lo que más le convendría sería traicionarlo también, porque reduciría su condena de 3 a 2 años. Por un argumento de simetría, encontramos que lo que más le conviene a B sería, también, traicionar a su compañero en cualquier caso. El dilema surge porque, si ambos cooperaran tendrían una pena de 1 año cada uno, pero ocurre que esta combinación no es posible bajo el supuesto de jugadores *egoístas y racionales*.

Para generalizar el problema y terminar de definirlo, presentamos la llamada matriz canónica de pagos para el dilema de los prisioneros (cuadro 2). En ésta, se observa que el pago que ambos reciben en caso de cooperación recíproca será R. Si A coopera y B traiciona reciben un pago *S* y *T*, respectivamente. En el caso contrario se invierten los pagos y, finalmente, en el caso en que ambos se traicionen, ambos reciben un pago *P*. Se dice que un juego obedece a la lógica de los prisioneros si se cumple que

$$T > R > P > S$$

ATRAPADOS EN EL TIEMPO, O RECETA PARA QUERER A TU ADVERSARIO

En los años ochenta del siglo XX, Axelrod se planteó el siguiente escenario: Sabemos que en el dilema de los prisioneros, a cada jugador le conviene la estrategia más egoísta que consiste en delatar a su compañero. Sin embargo, al hacerlo los dos llevan la peor parte, ¿qué pasaría si los prisioneros estuvieran *condenados a jugar* repetidamente esta situación, por un número indefinido de veces?, ¿podría surgir algún tipo de comportamiento diferente? Llamaremos a este nuevo planteamiento, el *juego iterativo de los prisioneros*.

La primera forma en que abordó este nuevo problema fue convocando a un torneo. Axelrod invitó a una serie de investigadores que trabajaban en el tema y les propuso que cada uno presentara la estrategia que seguirían. Se trataba de un torneo por invitación, en el que cada convocado representó a un *jugador*. Al terminar el campeonato, Axelrod determinó que el jugador que había logrado el mayor número de puntos había sido la estrategia propuesta por Anatol Rapoport, quien presentó un sencillo conjunto de reglas denominado TFT, por las siglas del inglés *tit for tat*, que podríamos traducir como “toma y daca” (u “ojo por ojo”). El com-

portamiento de la estrategia TFT, era muy sencillo: iniciaba cooperando y, luego, repetía la jugada que el otro había hecho en la ronda anterior. La estrategia TFT mostraba varias propiedades muy interesantes: por un lado, tenía una memoria de corto plazo, no recordaba más allá de lo que le había hecho su contrincante en la ronda previa del juego, por lo tanto, no disponía de un conjunto de reglas muy elaborado. Por otro lado, se descubrió que la estrategia TFT *forzaba* la cooperación entre los contrincantes.

Axelrod pensaba que el resultado de su torneo podría estar sesgado pues el número de participantes había sido muy reducido y, tal vez, la estrategia TFT no era sino un “tuerto en un país de ciegos”. Entonces decidió convocar a un campeonato con un mayor número de concursantes. Para su sorpresa, la estrategia TFT se volvió a coronar como campeona. En este momento se preguntaba si sería necesario convocar a una especie de copa mundial, para demostrar tan ampliamente como fuera posible, que la estrategia TFT era imbatible. Era todo un dolor de cabeza.

En un afortunado encuentro, Axelrod platicó con el biólogo Richard Dawkins, autor del libro *El gen egoísta*, que hoy se considera un clásico de la evolución. Axelrod le explicó a Dawkins acerca de la circunstancia en la que se encontraba y éste le sugirió que buscará ayuda en el grupo de investigación de John Holland, el inventor de los *algoritmos genéticos*, quien, al igual que Axelrod, trabajaba en la Universidad de Michigan. Axelrod también encontró a W. D. Hamilton, del equipo de Holland, y juntos conjeturaron que los juegos estratégicos podían entenderse como un espacio de búsqueda donde también puede operar la evolución.

Desde este punto de vista, la función de aptitud debería tender a maximizar el beneficio de los jugadores. Partiendo de un conjunto de estrategias arbitrarias, a las que sometió a una presión evolutiva, bajo el juego iterativo de los prisioneros, Axelrod encontró un *patrón* estratégico que emergió al cabo de varias generaciones. Este patrón coincidía, en los aspectos más generales, con la estrategia TFT.

El trabajo de Axelrod puso en evidencia que la cooperación es un fenómeno emergente que puede darse aun entre jugadores en pugna o egoístas. Se dice que, entre otras aplicaciones, disuadió a las potencias nucleares de iniciar una conflagración mundial, durante la guerra fría, y se utilizó como argumento a favor de un mecanismo de cooperación entre bandos.

En los registros históricos de la primera guerra mundial se sabe que los bandos contendientes establecieron, en el frente de las trincheras, un acuerdo tácito de cooperación. Ambos lados comprendieron que se encontraban ante un empate de fuerzas y que, además, estaban obligados a repetir indefinidamente la misma partida. Igualmente, se sabía que cualquier movimiento de un lado era respondido de la misma forma por el otro bando, justo lo que reconocemos como una característica de la estrategia TFT. También se consigna que, para aparentar obediencia a sus mandos respectivos, cada lado desarrolló estrategias de ataque simbólico o ritual, que no comprometían el saldo de una partida. Incluso, se reporta que los rivales salían de sus trincheras para convivir en ocasiones especiales como la navidad y el año nuevo. Ante la sinrazón de la guerra, la estrategia racional que cada bando

decidió fue la de “vive y deja vivir”.

Aquí, es importante señalar que, en el juego iterativo de los prisioneros, se requiere imponer una nueva restricción sobre los parámetros de la matriz canónica. En este caso es necesario garantizar también que $2R > T$, para prevenir que la alternancia entre cooperación y traición produzca mejores resultados que la cooperación mutua. También es importante insistir en el hecho que los contrincantes juegan un número indefinido de rondas o, visto de otra forma, no saben cuántas rondas van a jugar juntos. De lo contrario, cada uno tendría razones para traicionar al otro en la última ronda. Asimismo, si ambos están conscientes de ello, tendrían razones para traicionar en la penúltima ronda y, por el mismo razonamiento llevado hasta sus últimas consecuencias, ni siquiera podrían cooperar en la primera ronda.

Por otra parte, es interesante recapitular algunas de las propiedades más interesantes de la estrategia TFT. Se dice que induce la cooperación porque: 1) es *amable*, pues en la primera ronda prefiere cooperar; 2) responde de inmediato a cualquier acto de traición con la misma moneda; 3) sabe perdonar, porque puede volver a la cooperación si su oponente lo hace. En contraste, se han señalado algunas debilidades de la estrategia TFT. Si, por ejemplo, contendiera contra otro de su tipo y a uno de ellos le “temblara la mano” eligiendo por *error* la traición, entonces se enfrascarían en una secuencia inevitable de revanchas, en la que ambos perderían. Lo anterior significa que la estrategia TFT es muy *sensible* al ruido.

Más allá del importante resultado que implicó el trabajo de Axelrod, podemos reflexionar sobre las consecuencias epistemológicas de sus métodos, que abren una tercera vía para hacer ciencia, a partir de la simulación por computadora y el modelado con base en agentes. Hasta entonces, los científicos habían recurrido a la deducción para derivar teoremas partiendo de supuestos o axiomas. En otras circunstancias usaron la inducción para encontrar patrones a partir de datos empíricos.

Como en el caso de la deducción, la simulación comienza por un conjunto de supuestos rigurosamente establecidos acerca de un sistema bajo estudio, sin embargo, la simulación no desarrolla teoremas de aplicación general. En contraste, la simulación genera *datos* que pueden ser sujetos de análisis por inducción. Por otra parte, a diferencia de la inducción típica, los datos provienen de experimentos controlados en lugar de representar mediciones de un sistema del mundo real.

Así, *La evolución de la cooperación* abrió todo un nuevo campo de investigación que busca explicar la formación de sistemas complejos a partir de entidades en conflicto. Maynard-Smith, por ejemplo, propone que la célula es el resultado de la cooperación de algunos de sus organelos que, hasta antes de su unión, eran entidades independientes que competían por alimento. Por su parte, Tesfatsion sugiere que la formación de redes entre agentes económicos puede explicarse como una estructura que emerge de la interacción entre entidades que buscan maximizar su beneficio a través de la cooperación. Recientemente, los científicos de la computación se interesaron en las posibles implicaciones en el mundo de las computadoras que interactúan, esto es, la computación distribuida.

COMPUTADORAS Y JUEGOS ESTRATÉGICOS

En una red entre pares, o P2P (por las siglas en inglés de *peer to peer*), los equipos participantes forman una red en la que cada uno ofrece sus capacidades, esperando aportar y recibir un beneficio. Esto significa que cada equipo se integra a una organización donde puede fungir como proveedor de un servicio o recibir beneficios como usuario.

Se considera a las redes P2P como una alternativa promisoría para hacer frente, entre otros, al problema de almacenamiento. Esto es, se ha observado que cada día se requieren mayores capacidades de almacenamiento para soportar la mayor parte de las aplicaciones de cómputo. Una red P2P tendría la capacidad para alojar una cantidad masiva de información, como la que requieren las aplicaciones modernas.

Sin embargo, el mayor inconveniente que los críticos apuntan al respecto, es el hecho que cada par o equipo participante comparte sus recursos sin atenerse a un contrato que lo obligue a reservar una cuota mínima. Por tanto, la continuidad de las operaciones depende de la buena voluntad de los usuarios que se encuentran detrás de los pares participantes. En particular, se ha observado la presencia de máquinas oportunistas, que sólo acuden a la red para obtener un beneficio, sin aportar nada a cambio.

Supongamos que formamos con nuestros conocidos una red P2P, en la que participamos para almacenar y compartir películas. En los sistemas de almacenamiento distribuido, definimos la disponibilidad de un archivo como la probabilidad de necesitarlo y encontrarlo. Con el fin de mantener un cierto nivel de disponibilidad de la información, los archivos (o sea las películas) en custodia se deben replicar y sus copias asignarse a diferentes máquinas, también llamadas pares, desde las cuales podemos recuperar esa información.

Ahora, supongamos que un par abandona el sistema, donde participaba prestando sus capacidades de almacenamiento, y se lleva consigo un archivo que tenía bajo su responsabilidad. Cuando el sistema reconozca que el par se ha retirado, reconocerá también que la probabilidad de recuperar el archivo faltante se encuentra disminuida. Para recuperar su nivel de disponibilidad, podría seleccionarse un nuevo par activo y solicitar su participación para alojar una nueva copia de la película.

Aquí tenemos que enfatizar que el nuevo par designado recibiría la copia de un archivo que quizá jamás va a utilizar. Si acepta su nueva carga lo hace en beneficio de algún otro equipo que luego quisiera descargar el archivo en cuestión. El par recién invitado puede decidir entre aceptar o rechazar la solicitud. Si éste acepta, entonces recibe una copia de la película y, al mismo tiempo, reduce su capacidad disponible. En otro caso, declinaría la invitación.

Si todos los pares actuaran de forma *egoísta*, almacenando sólo aquellos archivos de su preferencia, entonces podría ocurrir que, en algún momento de la vida del sistema, ni siquiera pudieran recuperarse estos archivos. Si lo pensamos bien, esta situación nos recuerda al dilema de los prisioneros o, más exactamente, el jue-

go iterativo de los prisioneros, porque el juego se puede repetir un número indefinido de veces, en tanto estemos dispuestos a aportar las capacidades de nuestros equipos para participar en este sistema cooperativo.

Estudios recientes señalan que la cooperación podría implantarse entre los pares de un sistema P2P, si estos reconocen que, en cada ocasión que se solicitan sus capacidades, se encuentran ante un jugador con estrategia TFT que les *invita* a participar. En principio, la apuesta de este enfoque nos dice que la cooperación entre computadoras es un patrón que puede emerger, si sabemos elegir el juego adecuado.

La moraleja de esta historia es que los sistemas complejos, como los que se pueden encontrar en el interior de la propia Internet, se forman por la acción concurrente de muchas partes que no pueden ser controladas por una entidad central. No obstante, aun en estas circunstancias, es posible que surjan patrones de comportamiento orientados al mantenimiento de las operaciones cruciales del sistema y formas de cooperación entre las partes que forman al mismo. En estas circunstancias, dichas entidades ceden una parte de sus recursos para la construcción de un acervo colectivo lo que, eventualmente, también les puede reportar un beneficio.

BIBLIOGRAFÍA

- Axelrod, R. and W. Hamilton. 1981. "The evolution of cooperation". *Science*, (211):1390–96, Marzo.
- Ball, Philip. 2010. *Masa Crítica. Cambio, caos y complejidad*. Turner-Fondo de Cultura Económica.
- Beinhocker, E. D. 2006. *The Origin of Wealth*. Harvard Business School Press.
- Holland, John H. 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. The University of Michigan.
- Smith J. Maynard. 1982. *Evolution and the Theory of Games*. Cambridge University Press.
- Qiang, Z., X. Hui-feng and K. Xiao-dong. 2007. "An evolutionary game model of resource-sharing mechanism in P2P networks". En *IEEE Comp. Society Workshop on Intelligent Information Technology Application*, pp. 282–285.
- Tesfatsion, L. 2002. Agent-based computational economy: Growing economies from the bottom up. *Artificial Life*, 8(1):55–82.
- Von Neumann, J. and O. Morgenstern. 1944. *Theory of games and economic behaviour*. Princeton University Press.
- Wikipedia. 2014. The prisoner's dilemma. http://en.wikipedia.org/wiki/Prisoner%27s_dilemma
- Yan, C., W. Beibei, W. S. Lin, W. Yongle and K. J. R. Liu. 2010. "Evolutionary games for cooperative P2P video streaming". En *17th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, pp. 4453–4456.