

COMPLEJIDAD Y URBANISMO:  
DEL ORGANISMO A LA CIUDAD

Octavio Miramontes ◉ Igor Lugo ◉ Liliana Sosa  
(Editores)

Octavio Miramontes • Igor Lugo • Liliana Sosa • Jorge Escandón •  
Gabriela de la Mora • Aleida Rueda • Mercedes Mercado • Og DeSouza •  
Pedro C. Souza

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

Este libro contiene material protegido por leyes de autor

Todos los derechos reservados © 2017

Publicado electrónicamente en México, por CopIt-arXives

Obra editada por Octavio Miramontes, Igor Lugo y Liliana Sosa.

Diseño de portada por Octavio Miramontes con base en la obra “The dark side of modern society” © de Igor Morski .

*Complejidad y Urbanismo: del organismo a la ciudad*

[Editores] O. Miramontes, I. Lugo y L. Sosa. — México CDMX: CopIt-arXives, 2017

Incluye bibliografías e índice

ISBN: 978-1-938128-08-0 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 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X. 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](http://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 y muy especialmente a Igor Morski por ceder los derechos de uso de su obra.

**ISBN: 978-1-938128-08-0 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

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	
<i>O. Miramontes, I. Lugo y L.B. Sosa</i>	<b>1</b>
<b>URBES NO HUMANAS</b>	
<i>O. DeSouza, P.C. Souza y O. Miramontes</i>	<b>5</b>
Introducción . . . . .	5
La urbe de termitas . . . . .	8
Estructura física . . . . .	8
Estructura y dinámica social . . . . .	12
Castas de termitas y asignación de roles . . . . .	12
Hábitos higiénicos y sanitarios . . . . .	13
Alimentación . . . . .	15
Comunicación . . . . .	16
Complejidad en la <i>urbe</i> de las termitas . . . . .	18
Universalidad y escalamiento . . . . .	19
Emergencia de patrones . . . . .	19
Transiciones de fase . . . . .	21
Conclusiones . . . . .	21
Agradecimientos . . . . .	23
<b>RED GEOESPACIAL DE CIUDADES</b>	
<i>Igor Lugo</i>	<b>29</b>
Introducción . . . . .	29
Materiales . . . . .	31
Sistema de Ciudades y Redes Espaciales . . . . .	31
Economía y Geografía . . . . .	32
Redes y Espacio . . . . .	33
Resultados . . . . .	35
Discusión . . . . .	39

<b>INFRAESTRUCTURA URBANA BASADA EN SISTEMAS COMPLEJOS ADAPTATIVOS</b>	
<i>Liliana B. Sosa Compeán</i>	<b>45</b>
Introducción . . . . .	45
Las ciudades como sistemas complejos y su infraestructura como componente esencial . . . . .	45
Los procesos y morfogénesis en las urbes . . . . .	47
Diseño de la infraestructura urbana basado en las teorías de sistemas . . . . .	52
Conclusiones . . . . .	55
<b>IDENTIDAD DE LAS CIUDADES DESDE LA COMPLEJIDAD</b>	
<i>Mercedes Mercado</i>	<b>57</b>
Introducción . . . . .	57
Consideraciones sobre la identidad y la ciudad como unidad compleja . . . . .	58
Delimitando qué es la identidad desde el punto de vista de la complejidad . . . . .	58
Elementos de análisis de la identidad de una ciudad . . . . .	58
La ciudad como <i>unidad compleja</i> ; quién y cómo se configura . . . . .	62
División . . . . .	62
Inducción . . . . .	63
Concentración/Degradación . . . . .	63
Desenvolvimiento/despliegue . . . . .	64
Resonar/sintonizar . . . . .	64
Continuidad/Discontinuidad . . . . .	65
Controlar/organizar . . . . .	65
Destilar . . . . .	65
Conclusiones . . . . .	66
<b>LA PERIFERIA URBANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO: ENTRE LA COMPLEJIDAD DE LAS POLÍTICAS DE CONSERVACIÓN Y LA INERCIA DE LA EXPANSIÓN URBANA</b>	
<i>Jorge Escandón</i>	<b>69</b>
Introducción . . . . .	69
Contexto global . . . . .	70
Definición conceptual y diversidad de perspectivas de la periferia urbana . . . . .	71
Pensamiento sistémico y complejidad . . . . .	73

Enfoques de la periferia urbana . . . . .	77
Conservación en la periferia urbana de la Ciudad de México . . . . .	79
SC, periferia urbana y sistemas complejos . . . . .	82
<b>SISTEMAS SOCIO-ECOLÓGICOS URBANOS Y ÁREAS NATURALES PRO-</b>	
<b>TEGIDAS: CARACTERIZACIÓN DE LA METRÓPOLI DE GUADALA-</b>	
<b>JARA, MÉXICO</b>	
<i>Gabriela de la Mora</i> . . . . .	<b>91</b>
Introducción . . . . .	91
Métodos . . . . .	93
Caracterización del Sistema de ANP de Guadalajara . . . . .	94
Acción social como impulsora de un sistema de ANP urbano . . . . .	99
Agradecimientos . . . . .	100
<b>CIUDAD VIVA: POR UNA PLANEACIÓN URBANA CADA VEZ MÁS CIEN-</b>	
<b>TÍFICA</b>	
<i>Aleida Rueda</i> . . . . .	<b>103</b>
La tendencia para vivir: ciudades . . . . .	104
Más con menos: ¿el éxito indiscutible de la ciudad? . . . . .	105
El límite de la ciudad . . . . .	107
Una nueva planeación urbana . . . . .	110

⊙ *Esta es una página en blanco.* ⊙

## INTRODUCCIÓN

EL presente libro trata sobre un tema actual y vigente: el entorno urbano –las ciudades–. En él, un grupo interdisciplinario conformado por físicos, biólogos, arquitectos, economistas, diseñadores y urbanistas, discuten sus ideas y visiones guiados y unificados bajo el paradigma y enfoque de la *complejidad*. Se trata de entender y explicar fenómenos emergentes y colectivos en el contexto urbano, haciendo uso conceptual de lo que los físicos llaman el “principio de superposición”: *el todo es más que la suma de las partes*. Así, las ciudades son más que la suma de sus espacios arquitectónicos o que los actos de sus habitantes aislados. Son entidades con vida propia que fluctúan entre las escalas de lo personal y de lo colectivo. Son escenarios de la vida de millones de seres cuya presencia efímera es moldeada por la ciudad, su ecología, su cultura y su identidad. Pero esa contribución individual, por otra parte, es lo que da sentido, construcción y vigencia histórica a una ciudad. Una ciudad no es sin sus habitantes: pero estos tampoco lo son sin ella. Es este vaivén de múltiples escalas en el espacio y en el tiempo que la ciencia moderna de los *sistemas complejos* desea entender y este libro pretende ser una pieza en la construcción de ese conocimiento.

Las ciudades no son fenómenos exclusivamente humanos, argumentan Og DeSouza, Pedro C. Souza y Octavio Miramontes en su capítulo *Urbes no humanas*. Son un fenómeno más bien común en la naturaleza y para ello exploran comparativamente las estructuras y dinámica de los nidos de termitas. Los autores explican que el reciente paradigma (*de la complejidad*) en el que las ciudades parecen funcionar como organismos vivos bajo las reglas de los sistemas complejos es válido. Pero lo ha sido así para el caso de las urbes de termitas durante por lo menos 90 millones de años. En ese sentido no habría nada de especial en cuanto a la dinámica fundamental de las urbes humanas pues operan bajo los mismos principios generales de fenómenos colectivos, en los que pueden encontrarse procesos de autoorganización, escalamientos, transiciones de fase, etc.

En las ciudades humanas existe una compleja red de estructuras e in-

teracciones entre componentes individuales que produce la emergencia de fenómenos como la cultura, el medioambiente urbano, la delincuencia, los movimientos sociales contestatarios, etc. Pero existen además metainteracciones entre ciudades, es decir, un concepto de sistema de ciudades, muy utilizado en estudios urbanos porque describe inductivamente la interacción de actividades, áreas y personas por medio de proximidades geográficas, físicas, sociales o económicas. La dinámica de las redes entre ciudades es el tema del capítulo *Red geoespacial de ciudades* de Igor Lugo. En su contribución, el autor explica que el sistema de interacción entre ciudades puede asociarse con un grafo en donde se muestran nodos y líneas que se relacionan directamente con datos espaciales de áreas urbanas e infraestructuras de transporte por carretera en México. El principal resultado es una red espacial que muestra atributos urbanos y de transporte para el desarrollo de estudios empíricos futuros.

En el capítulo *Infraestructura urbana basada en sistemas complejos adaptativos*, Liliana B. Sosa nos explica como las ciudades y su infraestructura nos representan como sociedad y son un claro reflejo del desarrollo tecnológico y de la organización social que como humanidad hemos alcanzado. Las urbes crecen en complejidad a la par de los adelantos en las maneras de comunicarnos y en las tecnologías de diversa índole. La magnitud que han alcanzado las ciudades ha provocado la necesidad de contar con estrategias en el diseño de la infraestructura urbana que evite el colapso del sistema ciudadano. Para poder enfrentar los retos que esto implica para los diseñadores del desarrollo urbano, es indispensable identificar las ciudades desde el enfoque de la complejidad, para poder dar soluciones a problemas en contextos complejos y cambiantes. La naturaleza organizada en sistemas complejos adaptativos ha desarrollado diseños y estrategias increíblemente eficaces para el desarrollo y permanencia de sus mismos sistemas, por lo que un modelo de diseño basado en las dinámicas, patrones y procesos que los sistemas complejos adaptativos comportan, nos puede dar las pautas para diseñar de una manera eficiente y efectiva, a las ciudades y su infraestructura.

¿Qué causa que al percibir ciertos objetos urbanos podemos reconocer la ciudad a la que pertenecen? ¿Qué hace que una ciudad se diferencie de otra? ¿Son los objetos urbanos per se, los que otorgan esa distinción, o es quién los observa? Estas interrogantes, explica Mercedes Mercado en su capítulo *Identidad de las ciudades desde la complejidad* nos llevan a plantear un proceso de descripción de cuál puede ser el fenómeno de causación formativa en una ciudad, identificándola mediante sus objetos urbanos. En este

capítulo, la autora pretende explicar y resumir los hallazgos de una investigación sobre identidad; entendida como un proceso para separar y distinguir a un sistema (en este caso la ciudad) de su entorno y poder analizar cómo éstas adquieren su forma. A ésta morfogénesis citadina le denomina “Proceso de Identidad”.

La morfogénesis citadina ocurre en un contexto histórico y social. El capitalismo de nuestros días es un proceso de circulación de capital y necesariamente se encuentra geográficamente organizado y, en su forma más avanzada, toma la apariencia geográfica de lo que ha sido llamado la urbanización planetaria. En *La periferia urbana de la Ciudad de México: entre la complejidad de las políticas de conservación y la inercia de la expansión urbana* Jorge Escandón reflexiona que la urbanización del capital es simultáneamente la urbanización de la naturaleza. Así que, la circulación del capital, lo que llamamos “la economía” es también, un proceso de metabolismo social en el que circulan componentes físicos, químicos y biológicos. Esto es, la transformación de materia en nuevas formas materiales. Cualquier forma de transformación económica también implica la transformación de la naturaleza y la materia basándose en decisiones políticas. Por supuesto que estos procesos políticos y ecológicos, a pesar de estar organizados en y a través de la urbanización, cada vez se manifiestan más a escala planetaria, y eso nos lleva a estudiar las distintas escalas geográficas a través de las cuáles la circulación de capital se organiza, mantiene y transforma.

La compleja conexión entre sistemas sociales y ecológicos está mediada por múltiples aspectos físicos, relaciones de dependencia, así como relaciones mutualistas y antagónicas. Los sistemas naturales se integran a través de los flujos de materiales y energía; mientras que los sociales lo hacen a través de flujos de información y comunicación. En los hechos, la integración y coordinación de ambos componentes es compleja, lo que se manifiesta, entre otras cosas, en la degradación ambiental que se experimenta actualmente a nivel planetario. En su capítulo *Sistemas socio-ecológicos urbanos y áreas naturales protegidas: caracterización de la metrópoli de Guadalajara, México* Gabriela de la Mora analiza el caso extremadamente complejo de las áreas naturales protegidas en el estado de Jalisco.

Finalmente, este libro cierra sus páginas con el capítulo *Ciudad viva: por una planeación urbana cada vez más científica* de Aleida Rueda. Este capítulo está basado en la obra premiada de la autora y trata sobre los retos de la planeación urbana y como ellos pueden abordarse cuando se considera a la ciudad como un sistema complejo viviente.

Los autores del presente volumen, han contribuido con sus textos de

manera generosa para afianzar un proyecto de acceso abierto del conocimiento, en el que éste no es visto como una mercancía a la manera de como lo es ya casi todo en el mundo neoliberal del siglo XXI. El texto resultante en el tema de la complejidad y el urbanismo, uno de los pocos en lengua española, se pone a disposición de estudiantes, expertos y público en general mediante su distribución gratuita en internet. Los autores no esperan otra cosa que ser leídos y contribuir con sus ideas a un mejor entendimiento del tema.

LOS EDITORES  
UNAM Y UNL, 2017

## URBES NO HUMANAS

Og DeSouza, Pedro C. de Souza y Octavio Miramontes\*

### INTRODUCCIÓN

**C**IUDADES, metrópolis o urbes no son fenómenos exclusivamente de naturaleza humana. Sociedades finamente estructuradas y funcionales, compuestas por millones de individuos socialmente interactuantes, abrigados en grandes y elaboradas estructuras físicas funcionales y eficientes existen, por lo menos, desde el Triásico superior hace alrededor de 220 millones de años (Hasiotis y Dubiel, 1995); mucho, mucho tiempo antes que nuestro primer ancestro bípedo pusiera sus pies en la Tierra. De hecho, no es descabellado pensar que toda estructura física construida con el propósito de abrigar y dar sustento a una compleja red de interacciones sociales donde existen flujos de materias e información entre los individuos que conforman una sociedad, califica como *urbe*. Tendríamos que incluir entonces a los primeros organismos vivos de nuestro planeta que hace alrededor de 3.48 mil millones de años florecieron en aglomerados físicos llamados tapetes bacterianos o biopelículas (Miramontes y DeSouza, 2014).

Existen diversas definiciones para la palabra *urbe*; sin embargo todas ellas convergen a la idea de una gran concentración de población socialmente interactuante, en un espacio específico<sup>1</sup>. Lo interesante de estas definiciones es que omiten hacer referencia explícita a individuos humanos y por ello, su aplicación a otras especies es posible. Un caso específico es el de los insectos sociales donde estructuras físicas emergen de la interacción de sus componentes individuales en todo el sentido del concepto de un sistema complejo (Theraulaz y col., 2003).

---

\*Universidade Federal de Vicosa, Brasil y Universidad Nacional Autónoma de México, México

<sup>1</sup>Por ejemplo la Real Academia de la Lengua Española define *urbe* como “Ciudad, especialmente la muy populosa”

La analogía entre colonias de termitas, el ejemplo que aquí examinaremos, y las urbes humanas tiene como base el que ambas están caracterizadas por un componente físico (las construcciones edificadas modularmente), un componente biológico (los individuos que ahí residen) y un componente social (comunicación e intercambio de información coherente). Pero esta analogía va más allá, de hecho reside en los detalles de los procesos dinámicos y patrones emergentes, es decir, en las propiedades genéricas de complejidad que les caracteriza.

A pesar de sus obvias diferencias, tanto termitas como humanos construyen estructuras físicas igualmente elaboradas y cuyas dimensiones finales sobrepasan en varios ordenes de magnitud el tamaño del individuo que las construye. Además de la construcción, las termitas se ocupan del mantenimiento de sus nidos (termiteros), lo que incluye reconstrucción, reparación, expansión, limpieza e higiene, vigilancia de sus fronteras, etcétera. Para ello se valen de un refinado sistemas de comunicaciones de corta y larga distancia y de eficientes vías de circulación y transporte. Al mismo tiempo estas dos especies animales son igualmente capaces de una intensa interacción interindividual y por eso forman sociedades sumamente cohesionadas. Una muestra de lo anterior, es el hecho de que las sociedades de termitas –lo mismo vale para las humanas– se componen de individuos especializados en funciones distintas, complementarias y vitales para la supervivencia del grupo. La dependencia que tienen las termitas con su contexto social es tan grande que estos insectos sobreviven más tiempo cuando están en contacto directo con compañeros del mismo nido, contrariamente a lo que sucede cuando están en aislamiento (Miramontes y DeSouza, 1996; DeSouza y col., 2001).

Tal vez la similitud más emblemática entre las ciudades de humanos y termitas es la perennidad de sus sociedades. Cuando los residentes mueren, estos son remplazados por una nueva generación igualmente funcional, incluso la muerte de una reina no es motivo para el fin de una colonia de termitas y, desde luego, la muerte de los gobernantes tampoco acaba con las urbes humanas. A menos que se trate de grandes catástrofes, las ciudades de termitas y las humanas pueden alcanzar una longevidad sorprendente. Jericó es tal vez la ciudad humana con ocupación continua más longeva. Esta ciudad en el Estado de Palestina tiene por lo menos una historia de ocupación continua que ronda los 11000 años. Pero las termitas, no se quedan atrás. Existe evidencia de termiteros que fueron ocupados a lo largo de siglos, tal vez miles de años, aún cuando la vida promedio de una reina no pasa de los 20 años (BBC, 2015).

El corolario de toda esta similitud es el sorprendente hecho de que las urbes de termitas o humanas no requiere de una inteligencia superior de corte individual o privilegiada con poderes especiales. Es inescapable la sugerencia de que los mismos procesos naturales que determinan la formación de urbes humanas sea común a las urbes no humanas. Dentro de estos procesos, es fundamental y preponderante el papel de las interacciones individuo-individuo como base para la emergencia de patrones complejos que son modulados por el medio físico (Partanen, 2015). Específicamente para el caso de termitas y de otros insectos sociales, se tiene cada vez más claro que la estructuración física y comportamental de sus sociedades obedece procesos típicos de sistemas complejos. En estos sistemas la interacción entre sus componentes básicos produce patrones temporales y espaciales de naturaleza colectiva que no están pre-establecidos al nivel de tales componentes. El proceso críticamente autoorganizado de construcción de los nidos de termitas (O'Toole y col., 1999) y el efecto no lineal de grupo en la tolerancia al estrés (Miramontes y DeSouza, 1996; DeSouza y col., 2001), son dos ejemplos clásicos de patrones emergentes de este tipo.

La misma noción discutida anteriormente, ha sido recientemente aplicada a urbes humanas, como se explica en los demás capítulos de este libro. Las metrópolis humanas deben ser pensadas como sistemas complejos cuya intrincada organización polifacética es el resultante de las interacciones entre sus partes, al contrario del resultado de una planificación global pre-establecida (Batty, 2008).

En el presente capítulo trataremos específicamente de la estructura, organización y funcionamiento de urbes construidas, mantenidas y habitadas por termitas. Para mayor claridad dividiremos el capítulo en dos grandes partes. Primero describiremos la estructura física de los termiteros junto a la organización y dinámica social. En segundo lugar abordaremos el funcionamiento de estas urbes desde la óptica de los sistemas complejos.

El mensaje subyacente a este texto es que el reciente paradigma que considera que las ciudades pueden funcionar como organismos vivos bajo las reglas de los sistemas complejos (Batty, 2007) parece válido. Ha sido así para el caso de las urbes de termitas durante por lo menos 90 millones de años.

## LA URBE DE TERMITAS

## Estructura física

Las estructuras que las termitas construyen para abrigar sus colonias, los llamados termiteros, son de formas muy variada y poseen diversas estructuras. No nos detendremos a sus múltiples detalles biológicos (ver por ejemplo, Noirot y Darlington, 2000; Korb, 2011). Mas bien trataremos de dar una visión global de sus arquitecturas resaltando sus similitudes con las urbes humanas.

Esta similitud puede ser vista en dos escalas: algunos termiteros se asemejan a ciudades enteras mientras otros se asemejan a enormes rascacielos. En los dos casos, la estructura básica es la misma: vías de circulación conectan subregiones donde la población local es más densa. Tales vías de circulación serían las calles de las ciudades, corredores en edificios o túneles en los termiteros. Las regiones de población más densa serían los barrios de las ciudades, los apartamentos en edificios y las camaras en los termiteros.

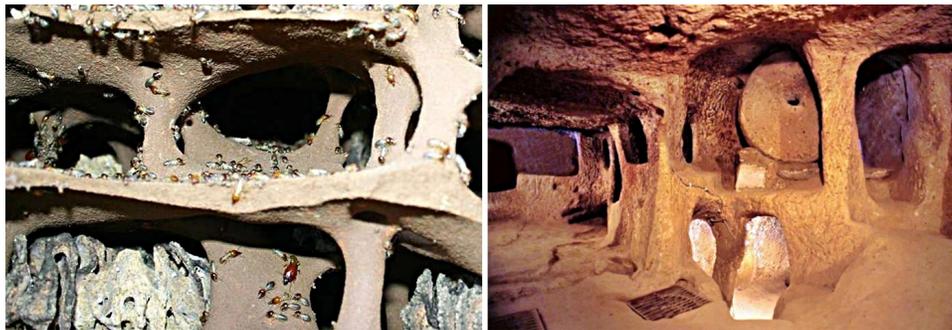


**Figura 1:** Izq. Ejemplo de túneles en una pieza de madera, excavados por una colonia híbrida de termitas (*Coptotermes formosanus* y *C. gestroi*) en Florida, EEUU (Fotografía proporcionada por [Thomas Chouvenec](#)). Der. Ejemplo de tuneles y cámaras en una colonia de *Reticulitermes speratus*.

Las estructuras más simples construidas por las termitas para albergar a sus colonias son apenas meras excavaciones de túneles en piezas de madera o en la porción más superficial del subsuelo (Figura 1 izq.). En estos casos, la colonia se distribuye por una red difusa compuesta por cámaras conectadas por túneles, sin que sea posible identificar una estructura central o dominante. Ejemplos clásicos de estos nidos ocurren en varios familias de

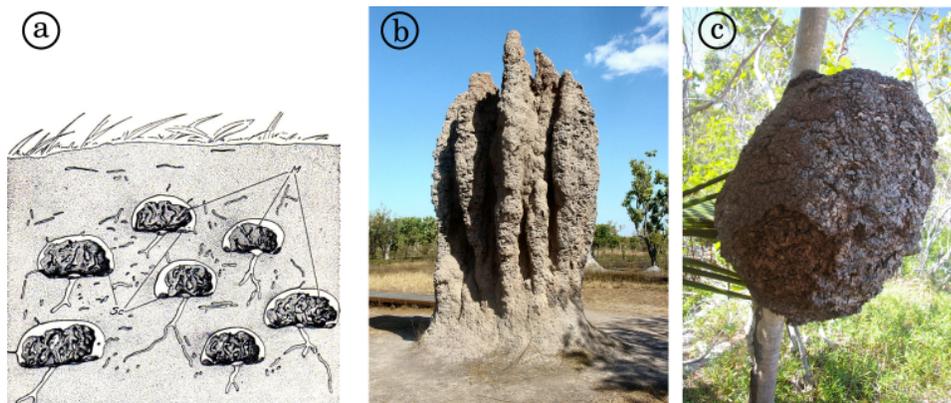
termitas, como en todos los Kalotermitidae y en varios Rhinotermitidae (*Reticulitermes*, es un ejemplo bien conocido. Figura 1 der.) (Howard y Haverty, 1981).

A lo largo de la evolución cultural humana, existen periodos –por ejemplo, el periodo troglodita– en los que grupos de humanos habitaron aldeas enteras excavadas en las montañas o en el suelo; de una complejidad urbanística mayor que simplemente la ocupación de cavernas naturales. Este es un caso de urbes similares a la organización espacial de diversos nidos de termitas. Los ejemplos incluyen pueblos ancestrales en la Oasisamérica (como los Anasazi y los Mogollón); Matmata en Túnez o la caverna de Gujaju en China. Ciudades enteras excavadas en el suelo incluyen ejemplos destacados como los de la región de Capadocia en Turquía (Kaymakli, por su extensión y Derinkuyu por su profundidad, ver Figura 2).



**Figura 2:** Izquierda: Galerías de una *urbe* subterránea de termitas que practican agricultura en forma de cultivo de hongos. Esta forma de subsistencia ha sido practicada durante por lo menos 30 millones de años en este tipo de nido (Fuente: [Phys.org](http://Phys.org)). Derecha: Galerías de la ciudad subterránea de Kaymakli en Capadocia, Turquía. Esta *urbe* frigia floreció aproximadamente hace 28 siglos. La ciudad contenía todas las estructuras necesarias para acomodar una población estable y tenía túneles que la unían con otras ciudades subterráneas vecinas situadas a varios kilómetros de distancia (abajo, fuente: [Anfrix.com](http://Anfrix.com)).

Algunos termiteros presentan niveles mayores de complejidad estructural. Algunos de ellos son subterráneos, otros son superficiales (epigeos) y también existen los arbóreos (Fig. 3). Tratase de edificaciones construidas y no meramente excavadas donde se emplean partículas de suelo cementadas unas con otras mediante saliva o heces. Como se fueran los ladrillos en construcciones humanas. Algunas especies de termitas, sobre todo del género *Nasutitermes*, utilizan un material semejante al cartón, aparentemente producido a partir de la digestión de madera.

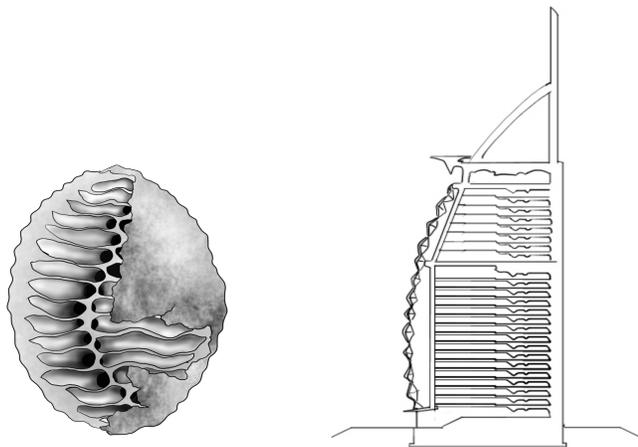


**Figura 3:** Ejemplos de construcciones hechas por termitas: (a) termitero hipógeo, construido en el subsuelo; (b) termitero epígeo en el Territorio Norte de Australia (c) termitero arbóreo en Tulúm, México. [CC Share Alike. (a) Dibujo de Sandias, 1893. Fotos de (b) Brian Voon Yeep Yap y (c) Tim Grace]

Las estructuras resultantes varían desde simples construcciones con simetrías redondas hasta edificios complejos y sorprendentemente regulares, como es el caso de los nidos subterráneos *Apicotermes* (Fig. 4) en África (Schmidt, 1955) y de *Procornitermes lespesii* en América del Sur, con su simetría radial, poros de ventilación y micro estructuras repetidas concatenadamente. Inclusive, llegan a existir nidos subterráneos compuestos de varias sub unidades interconectadas por túneles y galerías como si fueran “ciudades satélite” (ejem. Roisin y Pasteels, 1986). En la literatura especializada se les conoce como *policalia*.

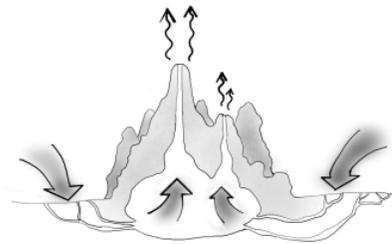
Las diferentes formas de termiteros son consideradas adaptativas porque responden a las presiones externas del medio ambiente, especialmente las del clima. Poros y ductos de ventilación, asociados a torres y a la orientación del nido con respecto a las caras de insolación, permiten a las termitas mantener condiciones de temperatura y humedad ideales al interior del nido (Korb, 2011; Korb, 2003). Estrategias similares se emplean en las construcciones humanas (Fig. 5).

La topología de interconexión entre cámaras conectadas por túneles es extremadamente importante para el transporte de materiales y la dinámica de comunicación interna dentro del nido. De hecho, se sabe, al estudiar detalladamente la arquitectura interna de los nidos de *Cubitermes* spp., que la topología de redes de galerías representan un compromiso excelente entre eficiencia de conectividad y defensa contra ataque de depredadores (Perna



**Figura 4:** El nido de la termita *Apicotermes* (izquierda), en sección transversal, presenta una serie de “pisos” sobrepuestos y regularmente arreglados dentro de un formato oval. A la derecha se muestra la sección transversal del hotel “Burj Al Arab” en Dubai, que obedece a un patrón espacial similar.

y col., 2008).



**Figura 5:** En la ciudad de Harare en Zimbabue se encuentra el más grande complejo de oficinas y comercios de este país, el East Gate Centre. Su construcción sigue los principios de climatización usado por las termitas para garantizar que el edificio mantenga una temperatura agradable todo el tiempo de manera pasiva, sin el uso de costosos equipos de aire acondicionado o calefacción. [CC Share Alike. Foto de David Brazier]

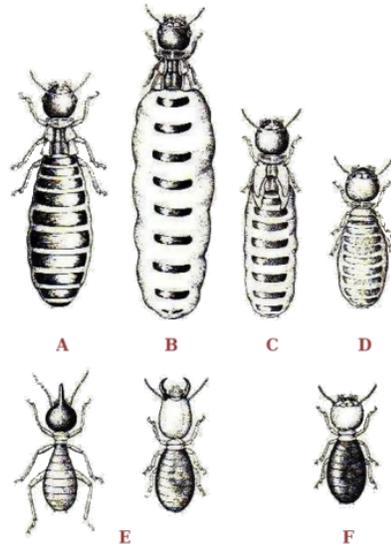
## Estructura y dinámica social

Un aspecto crucial de las sociedades de termitas es el hecho de que estas se componen de individuos especializados en determinadas funciones que, combinadas entre sí, garantizan eficiencia y cohesión, un aspecto desde luego similar con las sociedades humanas. En lo que respecta al componente social y biológico en más detalle, en ambas organizaciones sociales existe la comunicación interindividual vía contactos físicos directos y mediante señales a larga distancia; también existen los hábitos higiénicos colectivos y la protección y defensa. Finalmente es de subrayar la existencia de elaboradas prácticas para cultivar y cosechar los propios alimentos, entre otras conductas destacables.

*Castas de termitas y asignación de roles*

Existen normalmente tres tipos de individuos, o “castas” de individuos: los obreros, los soldados y los reproductores. Los dos primeros tipos corresponden a castas estériles y se ocupan de las funciones diarias de la colonia. Los reproductores consisten de una “pareja real” (en las abejas y en las hormigas existe una reina mientras que el rol de un rey no existe) cuya función única es la reproducción, es decir producir nuevos obreros, soldados y otros reproductores. Es posible que en una *urbe* de termitas exista más de una reina, de manera notoria en las más viejas o de mayor tamaño (Fig. 6 C y D). Aquí tenemos un paralelo evidente con la organización social humana en lo que se refiere a los modos de gobierno y estructura social y que de hecho refleja lo que los físicos de sistemas complejos han descrito sobre las relaciones entre tamaño de un colectivo urbano y la emergencia de sus propiedades, algo descrito por relaciones jerárquicas de tipo fractal. Una ciudad pequeña es gobernada comúnmente por un alcalde, mientras que las metrópolis un alcalde comparte poder con otros individuos de menor jerarquía organizados en sub-regiones y así sucesivamente.

Los soldados se ocupan principalmente de la defensa y para ello tienen adaptaciones morfológicas especiales que usan como armas mecánicas o químicas (Fig. 6). Pero no todas las especies de termitas tienen soldados. En donde no, los obreros se encargan de la defensa, como es el caso de los Apicotermitinae. Por su parte, los obreros se especializan en casi todas las actividades necesarias para mantener su colonia funcional y en crecimiento. Buscan el alimento, cuidan la prole, realizan mantenimiento del nido, entre otras actividades. Realizan también el pre-procesados del alimento que consumen los soldados y la pareja real. Al igual que en los humanos, exis-



**Figura 6:** Tipos de individuos presentes normalmente en una *urbe* de termitas. (A) rey, (B) reina, (C) reina secundaria, (D) reina terciaria, (E) soldado con defensa química y soldado con defensa mecánica, (F) obrero. [Sandias, 1893. Dominio público].

te un balance en la proporción de hembras y machos entre la población de obreros.

#### *Hábitos higiénicos y sanitarios*

La adopción de prácticas higiénicas y sanitarias colectivas y el desarrollo de tecnologías para ello (acueductos, alcantarillado, baños públicos, calzadas empedradas, etcétera), es uno de los factores que explican el porque las grandes *urbes* antiguas pudieron ofrecer calidad de vida a sus habitantes (Carneiro, 1974). La Roma antigua, fue el ápice europeo (pero también, y de manera independiente y coincidente, los ámbitos mesoamericanos y andinos) de un modelo de desarrollo urbano que arrancó desde el momento mismo en que los humanos abandonaron cuevas y cavernas para fundar grandes asentamientos colectivos fincados en la cooperación emergente. Pero esta solución estuvo, antes, al alcance de las *urbes* de termitas desde hacía millones de años.

Así como en los humanos, la evolución social y biológica aportó a las termitas prácticas higiénicas sorprendentemente complejas y bien desarro-

lladas, tanto individuales como colectivas. Estas prácticas garantizan seguridad a la sociedad como un todo, pues reducen significativamente el riesgo de diseminación de enfermedades entre la población, al tiempo que fundamentan la dinámica de la interacción y cohesión social. Entre ellas destacan los comportamientos de auto-limpieza (“grooming” o [acicalado](#)) y de limpieza inter-individual (“allogrooming” o [acicalado social](#)) mediante las cuales se eliminan suciedades o contaminantes adheridos a los cuerpos de los individuos<sup>2</sup>.

Las pestes y plagas tienen un largo historial de azotes en las ciudades humanas y sobre todo antes de la era de los antibióticos. Se trata de enfermedades infecciosas que se propagan por el contacto directo entre individuos, por ello, una de las medidas más drásticas para mitigar la expansión de una epidemia infecciosa es evitar el contacto físico directo entre individuos. En el mundo animal, las epidemias infecciosas son una calamidad común y para ello existen mecanismos de defensa para mitigarlas (Cremer y col., 2007). En las *urbes* de termitas, existen mecanismos de detección y alerta que ayudan a controlar las infecciones contagiosas, pues los individuos evitan entrar en áreas donde existe la presencia de patógenos y cuyos efectos nocivos en la salud de los individuos, y de la colonia como un todo, podría resultar sumamente nociva (Rosengaus y col., 1998; Rosengaus y col., 1999; Myles, 2002).

Otros mecanismos sanitarios en termitas, de naturaleza colectiva y que exhiben una complejidad auto-organizada muy sofisticada, están presentes. Se trata por ejemplo del cuidado muy meticuloso que se le asigna al tratamiento de los cuerpos de individuos que han fallecido dentro del nido. Varias especies de termitas adoptan técnicas específicas para el manejo de cadáveres dentro de sus colonias. Pueden reciclar nutrientes practicando canibalismo de los cuerpos recientemente fallecidos o bien, para evitar la proliferación de enfermedades, suelen transportar a los fallecidos a cementerios designados y ahí enterrarlos. Estas zonas destinadas a los entierros están casi en todos los casos ubicados en las zonas más periféricas de los nidos (Jmhasly y Leuthold, 1999; Chouvenc y col., 2012; Neoh y col., 2012).

La limpieza del nido y el manejo de residuos en las *urbes* de termitas se resuelve mediante mecanismos autorganizados. Por ejemplo, el reciclado de excrementos que contienen sustancias antisépticas y que se aplica en la construcción de las paredes de los nidos, como se observa en *Coptotermes formosanus*. Esta especie usa saliva y excrementos para lograr una mezcla

---

<sup>2</sup>El acicalado es un comportamiento muy extendido en insectos sociales, como en las hormigas. ([Véase este enlace](#))

de suelo y madera semi-digerida que usa en la construcción de paredes de túneles. Pero esta mezcla tiene un alto contenido de naftalina lo que sirve para repeler artrópodos, helmintos o microorganismo diversos (Chen y col., 1998). Por ser volátil, este compuesto se propaga por toda la estructura de la *urbe* de la misma manera en como los humanos realizan fumigaciones contra plagas.

### Alimentación

Una de las ventajas de vivir en grupos socialmente interactivos y sedentarios, es la posibilidad de cooperar, logrando con ello la obtención mas eficiente de alimentos. De hecho, esta eficiencia es esencial para garantizar el funcionamiento de las grandes urbes densamente pobladas y las termitas no escapan de esta regla. Sus elaboradas estrategias para obtener alimentos incluye dos aspectos básicos: excavar el nido directamente dentro del recurso (como lo hacen las termitas que se alimentan de madera) o construir nidos bien elaborados, como se ha descrito en la sección . En este último caso, la búsqueda de alimentos depende de la organización de excursiones de forrajeo fuera del nido o bien, el desarrollo de prácticas “agrícolas” dentro del propio nido. Una innovación que antecedió a la revolución neolítica humana en millones de años.

Las termitas que construyen sus propios nidos suelen mantener colonias sumamente pobladas y por ello las conductas para obtención de alimentos son muy elaboradas. Como ya se mencionó arriba, una es la construcción de galerías y túneles subterráneos como es el caso de *Cornitermes cumulans* descrito por (Araújo y col., 2011). Otras especies forrajean en superficie como es el caso de *Constrictotermes cyphergaster* formando grandes columnas compuestas por obreros y soldados distribuidos en formaciones estructuradas fuertemente defendidas. Los obreros marchando en el centro y los soldados montando guardias en los flancos de las columnas (Miura y Matsumoto, 1998; Moura y col., 2006).<sup>3</sup>

La obtención más sofisticada de alimento lo realizan las 374 especies distintas de termitas de la subfamilia Macrotermitinae (Termitidae), comunes en África y el sudeste asiático. Estas termitas construyen nidos de gran tamaño y bien estructurados donde habitan millones de individuos (Darlington y Dransfield, 1987), los cuales requieren de grandes cantidades de alimentos de manera continua y estable. Para lograr este objetivo, desarrollaron a lo largo de su historia biológica, una capacidad para establecer

<sup>3</sup>Véase este vídeo de una columna de forrajeo como ejemplo



**Figura 7:** Nido de *Odontotermes* sp. abierto en la parte superior para mostrar dos cámaras de cultivo de hongos, en blanco. [CC-BY. Foto de Og DeSouza]

y mantener cultivos de hongos dentro de los nidos (Mueller y col., 2005). Véase la Fig. 7.

### *Comunicación*

Uno de los elementos cruciales para que una sociedad funcione es la existencia de flujos de información coherentes que mantienen a los individuos integrados y coordinados en las tareas de colectivas como, por ejemplo, la defensa, el cuidado de la prole, la obtención de alimento, etc. Las termitas son capaces de estructurar comportamientos colectivos

Las termitas son capaces de estructurar comportamientos colectivos creando flujos de información a partir de contactos físicos directos de corto alcance combinados con mensajes a largo alcance, en los que un individuo disemina la información al mismo tiempo para varios miembros de la colonia. De hecho la cooperación, y en última instancia el buen funcionamiento de la sociedad, dependen del balance óptimo entre comunicación y conectividad a nivel de los individuos y del grupo (Santos y col., 2006). Las ciudades humanas dependen también de este tipo de flujo para su funcionamiento.

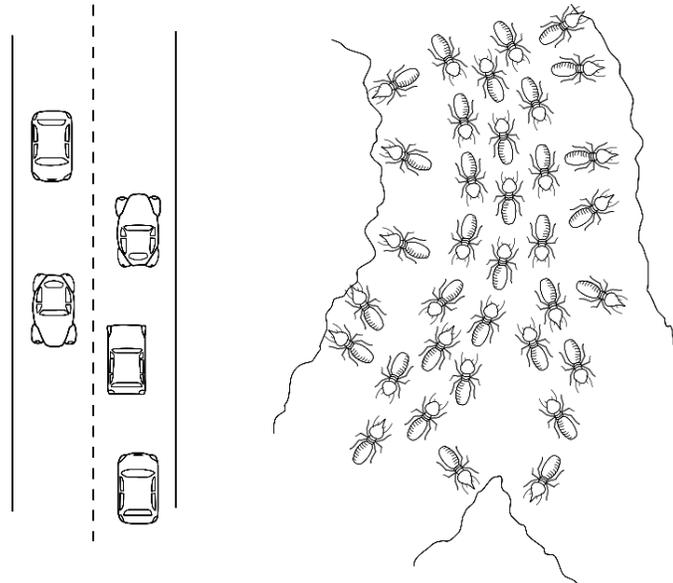
De entre los comportamientos colectivos basados primariamente en comunicaciones en la escala interindividual local, los menos entendidos hasta el momento son aquellos que involucran el aumento de la tolerancia del grupo al estrés naturales o artificial. Cuando se confina en arenas experimentales, las termitas resisten más tiempo a los efectos del hambre si están en grupos grandes que si lo que están en soledad (Miramontes y DeSouza, 1996). De manera más interesante, hay un tamaño óptimo de grupo

en el cual los individuos toleran mejor el envenenamiento por insecticida (DeSouza y col., 2001). Se supone que estos efectos colectivos emergen de alteraciones fisiológicas de desintoxicación que serían desencadenadas por estímulos interindividuales en intervalos óptimos DeSouza y Miramontes, 2004; Santos y col., 2004.

Los comportamientos de forrajeo de las termitas han sido estudiados con más detalle. Para ejecutarlos de forma eficiente, los individuos deben comunicar a los demás miembros de su colonia información sobre las fuentes de recursos, su posible riqueza y ubicación y de esa manera reclutar a sus compañeros para la exploración del recurso. Aquí los soldados desempeñan un papel fundamental: en varias especies son ellos los responsables de la localización del recurso y del reclutamiento de obreros, además de ocuparse de la defensa de la columna de forraje. Es también aquí que la comunicación de corto y largo alcance está presente de forma integrada. Las columnas de forraje, como se mencionó arriba, se organizan en bandas de flujo opuesto, que optimizan el tránsito de los obreros hasta la fuente de alimento y su vuelta al nido, cargando junto a ellos el recurso (Haifig y col., 2015). Estas bandas de flujo y contraflujo emergen principalmente a partir de los contactos individuales de manera autoorganizada (Fig.8).

En las últimas tres décadas se ha estudiado mucho la dinámica de las interacciones locales –y sus flujos locales de información asociados– y como este mecanismo sencillo da lugar a procesos autoorganizados que emergen a escalas globales. Esta es la esencia de los sistemas complejos y por ello los insectos sociales son un ejemplo por excelencia. Mucho de la formalización que existe hasta la fecha se resume en modelos discretos llamados “autómatas celulares” y su derivación posterior en los llamados “modelos basados en agentes”. Esta formalización matemática de procesos locales inspirada en sociedades de insectos, ha encontrado un nicho importante en la comprensión de procesos urbanos en las ciudades modernas (Colonna y col., 1998; Vanbergue y col., 2000; O’Sullivan y Torrens, 2001). Pero los procesos de comunicación en termitas va aún más allá de esto.

En el caso de algún riesgo inminente para la colonia, la comunicación de largo alcance pasa a ser vital y sustituye a los procesos locales. Las termitas son capaces de emitir alarmas utilizando una vía mecánica y una vía química, integrando tales vías para optimizar la transmisión de la información (Cristaldo y col., 2015). Dependiendo de la dosis de feromonas (sustancias químicas volátiles) proveniente de soldados (y en menor grado emitidas por obreros), se desencadenan diferentes respuestas colectivas. Las dosis más pequeñas unas vez percibidas producen señales vibratorias en indivi-



**Figura 8:** Flujo y contra-flujo de automóviles en carreteras (izquierda) e un patrón similar observado en los túneles de un nidos de termitas (derecha).

duos estacionarios, mientras que las dosis más grandes provocan estampidas y “pánico”, es decir, los individuos corren a alta velocidad alejándose aparentemente sin un rumbo definido. Este cambio de comportamiento desde una alerta individual hasta el pánico colectivo también se observa en multitudes humanas y donde el uso de un sentido común y juicioso cede su lugar a conductas desordenadas e irracionales (Helbing y col., 2000).

#### COMPLEJIDAD EN LA *urbe* DE LAS TERMITAS

El paradigma contemporáneo que afirma que las estructuras sociales emergen y se organizan a partir de la interacción local de los individuos es perfectamente aplicable a las termitas y sus sociedades. Tanto que es posible distinguir en el comportamiento de estos insectos y en sus construcciones, “huellas” claras de un sistema complejo, como ya se mencionó anteriormente. Estas serían tales como la emergencia de patrones libres de escala y patrones que sugieren la existencia de transiciones de fase en un sentido físico. Estas huellas están presentes, por ejemplo, en los patrones de construcción de nidos y túneles, en comportamientos de forraje, en el desplazamiento individual en el espacio, y en la vigilancia del nido y la

defensa.

#### Universalidad y escalamiento

Una de las características más evidentes de los sistemas complejos son la existencia de patrones que son independientes de escala. Estos son bastante perceptibles en las termitas, especialmente en la estructura de sus construcciones. El ejemplo más claro es el nido de *Apicotermes* spp. Con su estructura de platós superpuestos, típicamente fractal (ver Sección y Fig. 4). Pero la fractalidad y su consecuente independencia de escala está presente en otras estructuras físicas e incluso en los comportamientos individuales de las termitas. Por ejemplo, construyen túneles conectando nidos principales a nidos satélites usando una red de túneles cuya distribución fractal garantiza máxima eficiencia en la exploración del espacio (Griffon y col., 2015). De manera muy similar, algunas estructuras del transporte humano se distribuyen obedeciendo patrones fractales, como es el caso de las redes formadas por ciertas líneas de tren europeas (Benguigui, 1992). Esta eficiencia también está presente en los obreros de *Cornitermes cumulans*, cuyo comportamiento de búsqueda es compatible con estrategias libres de escala basadas en la exploración fractal del espacio (Miramontes y col., 2014). Esta exploración espacial garantiza mayor eficiencia en la atención de demandas vitales para el individuo (por facilitar la localización de alimento) y para la sociedad (al garantizar el encuentro más frecuente de otro individuo con quien interactuar). A manera de comparación se sabe actualmente que la movilidad humana en ciudades también sugiere patrones fractales asociados a los llamados vuelos de Lévy (Rhee y col., 2011).

#### Emergencia de patrones

Una de las características más notables de las agregaciones de animales –de minúsculas bacterias a vertebrados gigantescos– es que frecuentemente se comportan como una unidad compacta y coherente exhibiendo propiedades que no son meramente la suma de los comportamientos de los individuos que las componen (Parrish y Edelman-Keshet, 1999). Aunque los comportamientos individuales no exhiben ninguna reminiscencia de tales patrones, es en la sinergia de esos comportamientos que tales patrones emergen. A tal propiedad característica de los sistemas complejos se le conoce como “principio de superposición”.

Fue el zoólogo francés Pierre-Paul Grassé quien acuñó el término “estigmergia” luego de observar la conducta de construcción de nidos en termitas

(Theraulaz y Bonabeau, 1999; Grassé, 1959). Los obreros de las termitas observadas construyen nidos bastante complejos y de varias órdenes de magnitud mayores que ellos mismos, sin necesidad de un plan global. Para ello, cada operario deposita, inicialmente al azar, pelotas de arcilla mezclada con saliva y heces hasta que en algún punto se alcanza una densidad crítica de material depositado. Esta acumulación atrae (a través de las feromonas allí depositadas) nuevas deposiciones de pelotas, formando así pilares y paredes. Los tratamientos teóricos de este proceso de construcción apunta a que existe un proceso de criticalidad autoorganizada (CAO), es decir, una transición de fase sin que exista un control externo de parámetros (Bonabeau y col., 1998; O'Toole y col., 2003; Theraulaz y col., 2003). Procesos CAO en urbes humanas se han reportado recientemente (Portugali, 1997)

De igual manera, a partir de reglas básicas y simples, se forman las redes de transporte de materiales e información dentro de los nidos de termitas (Eom y col., 2015) lo cual se comparte con las urbes humanas (Barthélemy y Flammini, 2006; Strano y col., 2012). En última instancia, estas estructuras integran partes de un sistema que se extiende a distancias mucho mayores que aquellas en las que los procesos de difusión simple serían posibles. En el caso específico de las termitas, el diseño óptimo de estas redes permite la distribución rápida y económica de individuos por toda el área cubierta por el nido, facilitando el transporte de materiales (por ejemplo, alimento) y también la movilización de fuerzas de defensa.

La emergencia de patrones temporales autoorganizados a partir de interacciones interindividuales es otro fenómeno conocido en la dinámica social de las termitas. Los trabajadores de *Nasutitermes cf. aquilinus* resisten más tiempo al hambre cuando se confinan en grupos que cuando se confinan individualmente, exhibiendo un patrón temporal cualitativamente similar al que se muestra en modelos de autómatas celulares y cuya supervivencia depende de la tasa de contacto con sus conspecíficos (Miramontes y DeSouza, 1996). Este efecto de grupo es tan evidente que se ha observado en otras especies, por ejemplo en termitas *Cornitermes cumulans* que recibieron experimentalmente dosis sutiles de insecticida (DeSouza y col., 2001). Esto no es una coincidencia, la supervivencia de los humanos también puede ser afectada positivamente por los efectos de grupo, como declarado por los mineros atrapados dentro de una mina de cobre y oro, en el accidente de Copiapó en 2010 (Wikipedia, 2016). Este es un mecanismo de naturaleza no lineal que finalmente explica la emergencia de todo fenómeno colectivo que se puede observar en procesos urbanos y se le conoce comúnmente como "facilitación social"

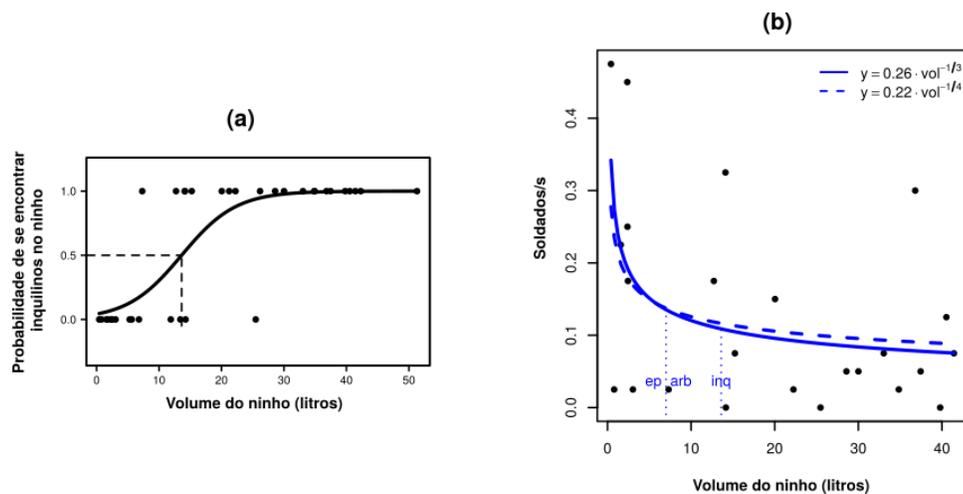
## Transiciones de fase

Otro aspecto de la complejidad en la sociedad de termitas es la ocurrencia de transiciones de fase en el funcionamiento de sus colonias. Aunque aún sin comprobación analítica formal, registros empíricos resaltan la ocurrencia de cambios bruscos entre dos estados a la medida que el nido de termitas aumenta de volumen o densidad. El aumento del volumen en nidos de termitas se considera indicativo de cambio de edad: los nidos más viejos tienden a ser mayores.

Un ejemplo de un posible cambio de fase se observa en las termitas *Constrictotermes cyphergaster*, cuyo nido es fundado y construido inicialmente sobre la superficie del suelo, allí persiste hasta que un nido arbóreo se construye y hacia este, la colonia entera se transfiere. Esto ocurre cuando el nido epígeo alcanza un volumen crítico, alrededor de siete litros (Vasconcellos y col., 2007). Esta transición del estado epígeo hacia el estado arbóreo va acompañada de otra transición: aumenta la probabilidad de que el nido sea invadido y habitado también por inquilinos (en este caso, termitas *Inquilinitermes microcerus*) cuando nido alcanza el volumen crítico de 13 litros (Cristaldo y col., 2012). Otra posible transición de fase se observa en este mismo momento (volumen = 13 litros): la proporción de patrullamiento (número de soldados por segundo atendiendo un disturbio) decae alométricamente alcanzando una tendencia asintótica (véase la Fig. 9) (DeSouza y col., 2016).

## CONCLUSIONES

Las similitudes entre las *urbes* de termitas y humanas van mucho más allá de sus habilidades de construir grandes edificios y ciudades. Ambos grupos de animales se organizan en sociedades en las que el contacto interindividual es esencial no sólo para la estructuración de su entorno físico (por la construcción de viviendas) sino también para el funcionamiento óptimo de la sociedad como un todo. Considerando que los mismos mecanismos fundamentales regulan ambos grupos, parece correcto afirmar que el fenómeno urbano no debe considerarse una característica dependiente exclusivamente de la inteligencia humana, sino un atractor de una dinámica compleja, de la que las *urbes* en general son un ejemplo. Por lo tanto, es evidente que la organización social en grandes grupos y poblaciones obedece a reglas básicas, presentes no sólo en las sociedades humanas, sino también en las sociedades de otros animales, especialmente las termitas. Los refinamientos de estas reglas pueden depender del ingenio humano y son



**Figura 9:** Conductas reminiscentes de una transición de fase en nidos de termitas. (A) Cuando el nido alcanza un volumen crítico (13 L) ocurre un cambio brusco en la probabilidad de encontrar inquilinos cohabitando el nido junto con la especie principal. Modificado de (Cristaldo y col., 2012). (B) El patrullamiento hecho por soldados decae alométricamente con el volumen del nido alterando sensiblemente la velocidad de este decaimiento en el volumen crítico de 7 litros, que es cuando la categoría migra del estado epígeo (“ep”) hacia el estado arbóreo (“arb”). El punto marcado como “inq” en el gráfico (b) representa el umbral de transición de probabilidad resaltado en el gráfico (a). Modificado de (DeSouza y col., 2016).

estos refinamientos los responsables de las pequeñas diferencias entre estas sociedades. Una lección que la naturaleza imparte a la imperfección urbana de nosotros los humanos es importante de aprender, como lo resalta el celebrado arquitecto catalán Antoni Gaudi (Marroquin, 2016):

*“El arquitecto del futuro se basará en la imitación de la naturaleza, porque es la forma más racional, duradera y económica de todos los métodos”*

#### AGRADECIMENTOS

Agradecemos las ideas inspiradoras de los Drs. A. Chopps y M. Xanic. Este trabajo es parte de los proyectos CAPES-CSF 0148/2012. ODS es becario del CNPq/Brasil (305736/2013-2). OM agradece el apoyo brindado por el Gobierno Federal de Brasil de la presidenta Dilma Russef por el nombramiento honorario como Investigador Especial Visitante de Brasil dentro del programa Ciencia Sin Fronteras 2013-2015 (CAPES). También agradece la hospitalidad del Laboratorio de Termitología de la Universidade Federal de Viçosa, especialmente la del Dr. Og DeSouza y la ayuda del proyecto PAPIIT-UNAM IN105015

#### REFERENCIAS

- Araújo, APA y col. (2011). “Resource suitability affecting foraging area extension in termites ( Insecta , Isoptera )”. En: *Sociobiology* 57.2, págs. 1-14.
- Barthélemy, M y A Flammini (2006). “Optimal traffic networks”. En: *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* 2006.07, pág. L07002.
- Batty, M (2007). “Complexity in City Systems: Understanding, Evolution, and Design”. En: *University College London, Working Paper Series* 117.
- (2008). “The size, scale, and shape of cities”. En: *Science* 319.5864, pág. 769.
- BBC (2015). *2000-year-old termite mound found*. <https://goo.gl/Fk6Ekk>.
- Benguigui, L. (1992). “The fractal dimension of some railway networks”. En: *Journal de Physique I* 2.4, 385–388. ISSN: 1286-4862. DOI: [10.1051/jp1:1992151](https://doi.org/10.1051/jp1:1992151). URL: <http://dx.doi.org/10.1051/jp1:1992151>.
- Bonabeau, E y col. (1998). “A model for the emergence of pillars, walls and royal chambers in termite nests”. En: *Philosophical Transactions of The Royal Society of London Series B-Biological Sciences* 353.1375, págs. 1561-1576.
- Carneiro, Robert L (1974). “A Reappraisal of the Roles of Technology and Organization in the Origin of Civilization”. En: *American Antiquity* 39.2-Part1, págs. 179-186.

- Chen, J. y col. (1998). "Termites fumigate their nests with naphthalene". En: *Nature* 392.6676, 558–559. ISSN: 0028-0836. DOI: [10.1038/33305](https://doi.org/10.1038/33305). URL: <http://dx.doi.org/10.1038/33305>.
- Chouvenc, T. y col. (2012). "Burial behaviour by dealates of the termite *Pseudacanthotermes spiniger* (Termitidae, Macrotermitinae) induced by chemical signals from termite corpses". English. En: *Insectes Sociaux* 59.1, págs. 119-125. ISSN: 0020-1812. DOI: [10.1007/s00040-011-0197-3](https://doi.org/10.1007/s00040-011-0197-3). URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s00040-011-0197-3>.
- Colonna, Antonio y col. (1998). "Learning Urban Cellular Automata In A Real World". En: *Cellular Automata: Research Towards Industry*. Springer, págs. 165-184.
- Cremer, Sylvia y col. (2007). "Social immunity". En: *Current biology* 17.16, R693-R702.
- Cristaldo, P. F. y col. (2015). "The nature of alarm communication in *Constrictotermes cyphergaster* (Blattodea: Termitoidea: Termitidae): the integration of chemical and vibroacoustic signals". En: *Biology Open* 4.12, 1649–1659. ISSN: 2046-6390. DOI: [10.1242/bio.014084](https://doi.org/10.1242/bio.014084). URL: <http://dx.doi.org/10.1242/bio.014084>.
- Cristaldo, Paulo F y col. (2012). "Termitarium volume as a determinant of invasion by obligatory termitophiles and inquilines in the nests of *Constrictotermes cyphergaster* (Termitidae: Nasutitermitinae)". En: *Insectes Sociaux* 59.4, págs. 541-548.
- Darlington, J. P. E. C. y R. D. Dransfield (1987). "Size relationships in nest populations and mound parameters in the termite *Macrotermes michaelsoni* in Kenya". En: *Ins. Soc* 34.3, 165–180. ISSN: 1420-9098. DOI: [10.1007/bf02224082](https://doi.org/10.1007/bf02224082).
- DeSouza, O y O Miramontes (2004). "Non-asymptotical trends in social facilitated survival of termites (Isoptera)". En: *Sociobiology* 44, págs. 527-538.
- DeSouza, O. y col. (2001). "Social facilitation affecting tolerance to poisoning in termites (Insecta, Isoptera)". En: *Insectes Sociaux* 48.1, págs. 21-24. ISSN: 0020-1812. DOI: [10.1007/PL00001739](https://doi.org/10.1007/PL00001739). URL: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/PL00001739>.
- DeSouza, Og y col. (2016). "Allometric Scaling of Patrolling Rate and Nest Volume in *Constrictotermes cyphergaster* Termites: Hints on the Settlement of Inquilines". En: *PLoS ONE* 11.1. Ed. por NicolasEditor Chaline, e0147594. ISSN: 1932-6203. DOI: [10.1371/journal.pone.0147594](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0147594). URL: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0147594>.
- Eom, Young-Ho y col. (2015). "Network-based model of the growth of termite nests". En: *Phys. Rev. E* 92.6. ISSN: 1550-2376. DOI: [10.1103/](https://doi.org/10.1103/)

physreve.92.062810. URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.92.062810>.

- Grassé, Plerre-P. (1959). "La reconstruction du nid et les coordinations interindividuelles chez *Bellicositermes natalensis* et *Cubitermes* sp. la théorie de la stigmergie: Essai d'interprétation du comportement des termites constructeurs". En: *Insectes Sociaux* 6.1, 41–80. ISSN: 1420-9098. DOI: 10.1007/bf02223791. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02223791>.
- Griffon, Diego y col. (2015). "Emergence, self-organization and network efficiency in gigantic termite-nest-networks build using simple rules". En: *arXiv preprint arXiv:1506.01487*.
- Haifig, Ives y col. (2015). "Dynamics of foraging trails in the Neotropical termite *Velocitermes heteropterus* (Isoptera: Termitidae)". En: *Behavioural Processes* 118, 123–129. ISSN: 0376-6357. DOI: 10.1016/j.beproc.2015.06.010. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.beproc.2015.06.010>.
- Hasiotis, Stephen T y Russell F Dubiel (1995). "Termite (Insecta: Isoptera) nest ichnofossils from the upper triassic chinle formation, petrified forest national park, Arizona". En: *Ichnos: An International Journal of Plant & Animal* 4.2, págs. 119-130.
- Helbing, Dirk y col. (2000). "Simulating dynamical features of escape panic". En: *Nature* 407.6803, págs. 487-490.
- Howard, R. y M. I. Haverty (1981). "Seasonal Variation in Caste Proportions of Field Colonies of *Reticulitermes flavipes* (Kollar)". En: *Environmental Entomology* 10.4, 546–549. ISSN: 1938-2936. DOI: 10.1093/ee/10.4.546. URL: <http://dx.doi.org/10.1093/ee/10.4.546>.
- Jmhasly, P y RH Leuthold (1999). "The system of underground passages in *Macrotermes subhyalinus* and comparison of laboratory bioassays to field evidence of intraspecific encounters in *M. subhyalinus* and *M. bellicosus* (Isoptera, Termitidae)". En: *Insectes Sociaux* 46.4, págs. 332-340.
- Korb, J (2003). "The shape of compass termite mounds and its biological significance". En: *Insectes sociaux* 50.3, págs. 218-221.
- Korb, Judith (2011). "Termite mound architecture, from function to construction". En: *Biology of Termites: A Modern Synthesis*. Ed. por D Bignell y col. Springer, págs. 349-373.
- Marroquin, Adolfo (2016). *Las termitas, consumados arquitectos*. <https://goo.gl/eIxsJo>. [Blog online, access Jul, 2016].
- Miramontes, O y O DeSouza (1996). "The nonlinear dynamics of survival and social facilitation in termites". En: *Journal of Theoretical Biology* 181.4,

- págs. 373-380. ISSN: 00225193. DOI: [10.1006/jtbi.1996.0138](https://doi.org/10.1006/jtbi.1996.0138). URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022519396901381>.
- Miramontes, Octavio y Og DeSouza (2014). "Social evolution: new horizons". En: *Frontiers in Ecology, Evolution and Complexity*. Ed. por M. Benítez y col. CopIt arXives, Mexico. ISBN: 978-1-938128-05-9. DOI: [10.13140/2.1.3757.2805](https://doi.org/10.13140/2.1.3757.2805). URL: <http://scifunam.fisica.unam.mx/mir/copit/TS0012EN/TS0012EN.html>.
- Miramontes, Octavio y col. (2014). "Lévy Flights and Self-Similar Exploratory Behaviour of Termite Workers: Beyond Model Fitting". En: *PLoS ONE* 9.10. Ed. por Christof Markus Editor Aegerter, e111183. ISSN: 1932-6203. DOI: [10.1371/journal.pone.0111183](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111183). URL: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0111183>.
- Miura, T. y T. Matsumoto (1998). "Foraging organization of the open-air processional lichenfeeding termite *Hospitalitermes* (Isoptera, Termitidae) in Borneo". En: *Insectes Sociaux* 45.1, 17–32. ISSN: 1420-9098. DOI: [10.1007/s000400050065](https://doi.org/10.1007/s000400050065). URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s000400050065>.
- Moura, F. M. S. y col. (2006). "Seasonality in foraging behaviour of *Constrictotermes cyphergaster* (Termitidae, Nasutitermitinae) in the Caatinga of Northeastern Brazil". En: *Insectes Sociaux* 53.4, págs. 472-479. ISSN: 0020-1812. DOI: [10.1007/s00040-005-0899-0](https://doi.org/10.1007/s00040-005-0899-0). URL: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s00040-005-0899-0>.
- Mueller, Ulrich G. y col. (2005). "The Evolution of Agriculture in Insects". En: *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 36.1, 563–595. ISSN: 1545-2069. DOI: [10.1146/annurev.ecolsys.36.102003.152626](https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.36.102003.152626). URL: <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.36.102003.152626>.
- Myles, Timothy G (2002). "Alarm, aggregation, and defense by *Reticulitermes flavipes* in response to a naturally occurring isolate of *Metarhizium anisopliae*". En: *Sociobiology* 40.2, págs. 243-256.
- Neoh, Kok-Boon y col. (2012). "Do Termites Avoid Carcasses? Behavioral Responses Depend on the Nature of the Carcasses". En: *PLoS ONE* 7.4. Ed. por Judith Editor Korb, e36375. ISSN: 1932-6203. DOI: [10.1371/journal.pone.0036375](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0036375). URL: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0036375>.
- Noirot, C y JPEC Darlington (2000). "Termite nests: architecture, regulation and defence". En: *Termites: evolution, sociality, symbiosis, ecology*. Ed. por T Abe y col. Kluwer Academic Press, págs. 121-140.

- O'Toole, DV y col. (1999). "Self-organized criticality in termite architecture: a role for crowding in ensuring ordered nest expansion". En: *Journal of theoretical biology* 198.3, págs. 305-327.
- (2003). "Self-Organized Criticality and Emergent Oscillations in Models of Termite Architecture with Crowding". En: *Journal of Theoretical Biology* 221.1, 15–27. ISSN: 0022-5193. DOI: [10.1006/jtbi.2003.3047](https://doi.org/10.1006/jtbi.2003.3047). URL: <http://dx.doi.org/10.1006/jtbi.2003.3047>.
- O'Sullivan, D y PM Torrens (2001). "Cellular models of urban systems". En: *Theory and Practical Issues on Cellular Automata*. Springer, págs. 108-116.
- Parrish, J. K. y L. Edelstein-Keshet (1999). "Complexity, Pattern, and Evolutionary Trade-Offs in Animal Aggregation". En: *Science* 284.5411, 99–101. ISSN: 1095-9203. DOI: [10.1126/science.284.5411.99](https://doi.org/10.1126/science.284.5411.99). URL: <http://dx.doi.org/10.1126/science.284.5411.99>.
- Partanen, J (2015). "Indicators for self-organization potential in urban context". En: *Environment and Planning B: Planning and Design* 42.5, págs. 951. DOI: [10.1068/b140064p](https://doi.org/10.1068/b140064p). eprint: <http://epb.sagepub.com/content/42/5/951.full.pdf+html>. URL: <http://epb.sagepub.com/content/42/5/951.abstract>.
- Perna, Andrea y col. (2008). "The structure of gallery networks in the nests of termite *Cubitermes* spp. revealed by X-ray tomography". English. En: *Naturwissenschaften* 95.9, págs. 877-884. ISSN: 0028-1042. DOI: [10.1007/s00114-008-0388-6](https://doi.org/10.1007/s00114-008-0388-6). URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s00114-008-0388-6>.
- Portugali, J (1997). "Self-organizing cities". En: *Futures* 29.4-5, págs. 353.
- Rhee, Injong y col. (2011). "On the levy-walk nature of human mobility". En: *IEEE/ACM transactions on networking (TON)* 19.3, págs. 630-643.
- Roisin, Y y J M Pasteels (1986). "Reproductive mechanisms in termites: polygamy and polygyny in *Nasutitermes polygynus* and *N. costalis*". En: *Insectes Soc.* 33.2, págs. 149-167.
- Rosengaus, RB y col. (1999). "Pathogen alarm behavior in a termite: a new form of communication in social insects". En: *Naturwissenschaften* 86.11, págs. 544-548.
- Rosengaus, Rebeca B. y col. (1998). "Disease resistance: a benefit of sociality in the dampwood termite *Zootermopsis angusticollis* (Isoptera: Termitidae)". En: *Behavioral Ecology and Sociobiology* 44.2, 125–134. ISSN: 1432-0762. DOI: [10.1007/s002650050523](https://doi.org/10.1007/s002650050523). URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s002650050523>.
- Santos, CA y col. (2004). "Social facilitation attenuating insecticide-driven stress in termites (Isoptera: Nasutitermitinae)". En: *Sociobiology* 44.2, págs. 1.

- URL: <http://www.isopectera.ufv.br/file.php/1/ourPapersPdf/Santosetal2004.pdf>.
- Santos, Francisco C y col. (2006). "Cooperation prevails when individuals adjust their social ties." En: *PLoS computational biology* 2.10, e140. ISSN: 1553-7358. DOI: [10.1371/journal.pcbi.0020140](https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.0020140). URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17054392>.
- Schmidt, Robert S. (1955). "The evolution of nest-building behavior in *Apicoterms* (Isoptera)". En: *Evolution* 9.2, págs. 157-181.
- Strano, Emanuele y col. (2012). "Elementary processes governing the evolution of road networks". En: *Scientific Reports* 2. ISSN: 2045-2322. DOI: [10.1038/srep00296](https://doi.org/10.1038/srep00296). URL: <http://dx.doi.org/10.1038/srep00296>.
- Theraulaz, Guy y Eric Bonabeau (1999). "A brief history of stigmergy". En: *Artificial life* 5.2, págs. 97-116.
- Theraulaz, Guy y col. (2003). "The formation of spatial patterns in social insects: from simple behaviours to complex structures". En: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A* 361, págs. 1263-1282.
- Vanbergue, Diane y col. (2000). "Modelling urban phenomena with cellular automata". En: *Advances in Complex Systems* 3.01n04, págs. 127-140.
- Vasconcellos, Alexandre y col. (2007). "Biomass and population structure of *Constrictotermes cyphergaster* (Silvestri) (Isoptera: Termitidae) in the dry forest of caatinga, northeastern Brazil". En: *Neotrop. entomol.* 36.5, 693-698. ISSN: 1519-566X. DOI: [10.1590/s1519-566x2007000500009](https://doi.org/10.1590/s1519-566x2007000500009). URL: <http://dx.doi.org/10.1590/s1519-566x2007000500009>.
- Wikipedia (2016). *Miners' survival during 2010 Copiapó mining accident*. <https://goo.gl/fpVoQf>. Última modificación 1 de Febrero de 2016, 19:44h. Acesoado el 11 de Febrero de 2016.

## RED GEOESPACIAL DE CIUDADES

*Igor Lugo\**

El estudio de interacciones entre ciudades es aproximado por medio de una perspectiva sistémica que describe una red compleja a gran escala. Sin embargo, modelar dicha red por medio de datos geoespaciales y asociarla con la teoría económica presenta importantes retos metodológicos. Se utilizan las principales ideas de la economía urbana y geografía económica, las herramientas de los sistemas de información geográfica y las contribuciones metodológicas de la ciencia de redes para explorar un proceso que modela una red espacial con atributos de un sistema de ciudades. En particular, el sistema se asocia con un grafo en donde se muestran nodos y líneas que se relacionan directamente con datos espaciales de áreas urbanas e infraestructuras de transporte por carretera en México. El principal resultado es una red espacial que muestra atributos urbanos y de transporte para el desarrollo de estudios empíricos.

\* \* \*

### INTRODUCCIÓN

EL concepto de sistema de ciudades es muy utilizado en estudios urbanos porque describe inductivamente la interacción de actividades, áreas y personas por medio de proximidades geográficas, físicas, sociales o económicas. Sin embargo, algunas investigaciones empíricas están siendo cuestionadas por el escaso uso de datos geoespaciales y racionalidad teórica que sustenten el sistema en cuestión (Wilson, 2002; Batty, 2014). Actualmente, los datos masivos o “big data” ofrecen nuevos materiales para

---

\*Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, Campus Cuernavaca, UNAM

el análisis espacial de la estructura y la dinámica de un conjunto de ciudades (Einav y Levin, 2014; Zhonga y col., 2014). No obstante, seleccionar y trasladar un subconjunto de estos datos a estructuras geoespaciales son procesos difíciles de realizar porque se afecta la relación entre inferencia-datos y datos-realidad (Leek y Peng, 2015). Del mismo modo, los estudios económicos han utilizado la economía urbana y la geografía económica para analizar el agrupamiento de actividades económicas localizadas o aglomeraciones (Krugman, 1996; Fujita y col., 2001), pero se han visto limitados al expandir y calibrar modelos idealizados con datos geográficos. Por otra parte, la ciencia de redes, en particular las redes espaciales, utiliza las matemáticas, geografía y computación para modelar estos datos, pero ésta carece de sustentos teóricos para explicar formas de organización social (Betencourt, 2013). Por lo tanto, el objetivo del presente capítulo es mostrar un proceso para modelar una red geoespacial de ciudades a través de combinar diferentes disciplinas y datos.

Se eligió el enfoque de sistemas complejos porque ofrece la metodología pertinente para el estudio de estructuras urbanas que se caracterizan por un creciente número e interacción de sus partes, funcionamiento de diversos mecanismos de organización y constante flujo asimétrico de personas, recursos e información. Estas propiedades se incorporan explícitamente en redes espaciales, las cuales se asocian con estructuras dependientes a la geografía (Lugo, 2013; Lugo y Gershenson, 2013; Ducruet y Lugo, 2013). Los grafos representan dichas estructuras ya que sus nodos se pueden relacionar con terminales o intersecciones y sus arcos se asocian con segmentos físicos de una red de transporte que conecta ciudades en el territorio (Kurant y Thiran, 2006; Okave y Sugiara, 2014). La principal fuente de materiales para generar esta clase de redes son los modelos vectoriales y raster, utilizados frecuentemente en los sistemas de información geográfica (SIG). Éstos contienen atributos cuantitativos y cualitativos que se incorporan directamente en la topología de la red. Por consiguiente, los principales cuestionamientos a tratar son cómo trasladar información geoespacial a un grafo y cuál aproximación teórica sustenta el análisis de redes espaciales. Para ello, se utilizaron datos de México y se usó el enfoque geográfico de la economía, la modelación matemática de teoría de grafos y las herramientas geográficas y computacionales de los SIG. Por lo tanto, se propone un método interdisciplinario para modelar y desarrollar estudios empíricos de sistemas urbanos a gran escala que contribuya a esclarecer algunas de sus propiedades.

El capítulo se divide en cuatro secciones. La primera sección describe

los materiales utilizados para generar la red geoespacial de ciudades. La segunda sección muestra la asociación entre las aportaciones teóricas de la economía y la aplicación de redes espaciales en sistemas complejos. Adicionalmente, presentamos el proceso para modelar un sistema de ciudades por medio de un grafo que contiene datos espaciales de ciudades y carreteras. La tercera sección expone el resultado del modelaje y explora la asociación entre dos propiedades comúnmente analizadas, pero independientemente estudiadas en sistemas urbanos: atractividad (tamaño de ciudad) y costos de transporte (distancia recorrida). La cuarta sección presenta las conclusiones y discute las limitaciones y extensiones del estudio.

## MATERIALES

La tecnología de los SIG organiza eficientemente datos masivos. En particular, el material geoespacial es almacenado a partir de sus atributos (coordenadas y valores temáticos), por ejemplo, los modelos vectoriales tienen características geométricas (conjunto de puntos y líneas) y los modelos raster son datos con atributos de imagen (píxeles) (De Smith y col., 2007). Sin embargo, la creciente disponibilidad de éstos en recursos públicos o privados hace complejo su proceso de selección, ya que existen múltiples recursos digitales con diferentes clases y escalas de información. Para solucionar esto, utilizamos datos oficiales del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) de México. Específicamente, se seleccionaron datos vectoriales, escala 1:1000000, de localidades urbanas y carreteras, los cuales se asociaron con las 384 ciudades clasificadas en el Sistema Urbano Nacional (SEDESOL y col., 2012; INEGI, 2014).

## SISTEMA DE CIUDADES Y REDES ESPACIALES

El estudio de sistemas de ciudades se relaciona con metodologías provenientes de diferentes disciplinas, por ejemplo, la economía, las matemáticas y la geografía. La economía brinda las ideas y conceptos fundamentales para entender los componentes del sistema y los procesos de interacción, las matemáticas ofrecen las herramientas para modelar dicha estructura y la geografía establece sus atributos espaciales. Así, el uso de un método interdisciplinario es fundamental para integrar las ventajas de cada disciplina. A continuación se expone una aproximación para formular un sistema de ciudades conectadas por carreteras y su análisis exploratorio.

El enfoque económico es fundamental para el análisis de un sistema de ciudades porque describe diferentes aspectos de éste. En particular, la economía urbana explica las condiciones iniciales y la geografía económica expone los mecanismos de crecimiento y cambio (Krugman, 1996; Fujita y col., 2001). Sin embargo, ambas presentan limitaciones en sus análisis empíricos debido al problema de selección, procesamiento y análisis de datos (Berry, 1964). Por lo tanto, una aproximación sistémica unifica ideas y conceptos con la finalidad de sustentar teóricamente aquellos modelos matemáticos y geográficos de cualquier sistema urbano.

La economía urbana estudia la distribución y localización de actividades económicas en las ciudades, específicamente, alrededor de un distrito central de negocios o “central business district” (Thünen, 1826; Christaller, 1933; Lösch, 1944; Alonso, 1964; Mills, 1967). En esta escala, las economías externas, las cuales son las ventajas en la producción cuando las empresas e individuos se localizan próximos unos de otros, juegan un papel fundamental para explicar la configuración espacial de aglomeraciones urbanas (Marshall, 1927; Fujita y Thisse, 2002; Henderson, 1974). Así, las economías de escala, rendimientos crecientes mayores a la unidad o relación entre costos y producción más que proporcional, y los costos de transporte explican el crecimiento y consolidación de ciudades con diferentes características, por ejemplo, uno o múltiples centros de actividades.

En el caso de un sistema de ciudades, la economía urbana explora el efecto exógeno de factores geográficos (clima, topografía y recursos naturales) que expliquen el surgimiento y ubicación de un conjunto de aglomeraciones (Redding, 2010). Asimismo, se analiza la distribución por tamaño de población y clase de ciudades para identificar la importancia de cada una de ellas en la formación de variables económicas agregadas (Henderson, 1980; Henderson, 1988; Abdel-Rahman y Anas, 2004). Las interacciones se examinan por medio del sistema de transporte, en donde las ciudades funcionan como nodos estratégicos en la red de rutas (Berry, 1964). Así, el transporte determina la accesibilidad y afecta el flujo de bienes y personas (Yamins y col., 2003). Por lo tanto, el sistema es determinista, viéndose cuestionado por la aleatoriedad y grado de interacción entre un conjunto de ciudades.

Por otra parte, la geografía económica estudia la dinámica de un sistema establecido al identificar procesos de acumulación que describan efectos de economías de escala entre concentraciones de población y actividades económicas en las ciudades (Fujita y col., 2001). En otras palabras, se enfatizan

las consecuencias de la interacción espacial. Un aspecto importante que se introduce es la incorporación de los costos “iceberg” de transporte, los cuales explican que una fracción del valor del producto en tránsito desaparece (Samuelson, 1952). Comúnmente, los modelos gravitacionales estiman parámetros asociados a variaciones de dicho costo por medio de una matriz de interacción. Ésta es un arreglo que relaciona pares de localidades (origen-destino) utilizando diferentes medidas de fricciones del transporte (Wilson, 2000; Rodrigue y col., 2013). Sin embargo, el estudio empírico de estas ideas se hace impráctico por la cantidad y disponibilidad de datos a utilizar. Esta limitante se ha resuelto utilizando modelos computacionales.

La aportación de (Krugman, 1996) representa uno de los primeros análisis para relacionar a la geografía económica y los sistemas de ciudades con esquemas de redes complejas. Krugman modeló una red circular, donde los nodos representan las ciudades y los arcos simbolizan la relación en distancia hacia sus vecinos más cercanos, para entender su efecto en el crecimiento poblacional de cada una de ellas. En particular, se propuso explicar el mecanismo por el cual se genera la regularidad estadística conocida como ley de potencia que no solamente se muestra en sistemas urbanos, sino también, en estructuras biológicas (Sornette, 2004). A pesar de que su aplicación empírica estuvo limitada por datos geoespaciales y recursos de computo de su tiempo, esta formulación mostró que las ciudades son ejemplos de sistemas complejos por excelencia (Batty, 2005; Batty, 2008). Así, la geometría del sistema es esencial para identificar diferentes mecanismos de crecimiento entre ciudades.

Por lo tanto, ambas subdisciplinas tienen el potencial de identificar la estructura y los mecanismos de cambio de sistemas urbanos. El análisis empírico de estos sistemas necesita incorporar modelos y herramientas de otras disciplinas para utilizar las ventajas de arreglos de datos extensos y los recursos actuales de cómputo.

#### Redes y Espacio

Las matemáticas ofrecen el método para modelar un sistema de ciudades por medio de grafos. Éstos se identifican como redes espaciales cuando su topología está contenida en un sistema de coordenadas geográficas, en donde los nodos representan objetos localizados y los arcos son rutas que los conectan (Okabe y Sugihara, 2011). En particular, las redes de transporte (terrestres, marítimas y aéreas) son representaciones de esta clase de estructuras espaciales (Barthélemy, 2011; Rodrigue y col., 2013). Sin embargo, el proceso para generar grafos con datos espaciales es complejo porque se

requiere la selección de datos que representen con precisión una red y algoritmos que la analicen. Además, su análisis es inductivo, limitando el desarrollo de una teoría. Así, la geografía por medio de los SIGs proporciona las herramientas para obtener y procesar datos geoespaciales que modelen un grafo con características de un sistema de ciudades.

Uno de los principales criterios para seleccionar datos que representen una red espacial entre ciudades es la geometría. Los modelos vectoriales tienen ésta característica porque son objetos formados por polígonos, líneas y puntos. Así, un conjunto de polígonos pueden representar explícitamente ciudades y un grupo de líneas reproducen las rutas de conexión entre aquellas. Por lo tanto, seleccionamos la topología del transporte terrestre por carretera como base y añadimos información a aquellos nodos que se asocian con atributos urbanos, en este caso, los polígonos urbanos. Los siguientes pasos describen el proceso para generar el sistema de ciudades conectadas por carreteras.

- a) Obtener los centroides de polígonos urbanos asociados con la clasificación de ciudades del sistema metropolitano nacional. Guardar los datos como una capa de puntos. Agregar un nuevo campo en la tabla de atributos que muestre la identificación única (ID) de cada punto. Los atributos urbanos, no obstante, pueden estar asociados con características del polígono y líneas de carreteras contenidas en éste (Lugo, 2013).
- b) Generar segmentos individuales de carreteras por medio de desagregar cada conjunto de líneas encadenadas que forman un objeto (*linestring*)
- c) Formar una capa de puntos que representen los puntos de inicio y final de cada línea individual. Añadir un nuevo campo en la tabla de atributos que muestre el ID de cada punto.
- d) Obtener la matriz de distancias utilizando la capa de puntos (centroides) de ciudades y puntos de inicio/fin. Utilizar la distancia Euclidiana para relacionar el punto de ciudad con el punto inicio/fin más próximo. Unir dicha matriz con la capa de puntos de inicio y final por medio del atributo de ID. Crear una nueva capa de puntos, los cuales se asocian con un punto particular dentro de la geometría de segmentos de carreteras.
- e) Generar el grafo del sistema de ciudades por medio de algoritmos

propios (Lugo, 2017), trasladando modelos vectoriales a una red espacial plana.

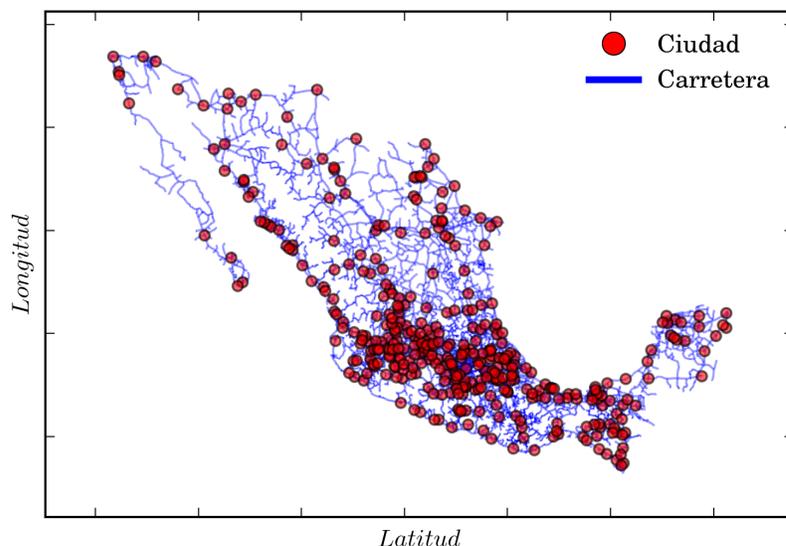
El principal resultado del procedimiento será un grafo plano ponderado (Newman y col., 2006), en donde los nodos presentan atributos de ciudades y los arcos tienen la propiedad de distancia. En consecuencia, incluimos medidas de tamaño (población) y distancia promedio (valor promedio de la distancia de una urbe con respecto a las demás mediante el camino más corto por ruta de carretera) por ciudad para analizar sus distribuciones de probabilidad (Pumain, 2006; Batty, 2006; Wilson y Dearden, 2011; SEDESOL y col., 2012; Lugo, 2013; Zhonga y col., 2014). Especialmente, se comparan arreglos de datos empíricos con distribuciones de probabilidad asociadas con sistemas complejos para identificar el mejor ajuste, el cual contribuye a reconocer probablemente el proceso que genera los datos (Sornette, 2009). Este método utiliza la prueba estadística Kolmogorov–Smirnov (KS) de bondad de ajuste y estima los respectivos parámetros por medio de máxima verosimilitud (MV) (Massey, 1951; Clauset y col., 2009). Por último, se describe la relación entre el tamaño y distancia promedio por medio de su correlación: diagrama de dispersión y coeficiente de correlación de Spearman (Zwillinger y Kokoska, 1999).

## RESULTADOS

Un sistema de ciudades, representado como una red espacial ponderada, muestra características que ayudan a la investigación empírica. En particular, la teoría económica ayuda a justificar el análisis, los SIGs ofrecen las herramientas para el uso de datos geoespaciales y la ciencia de redes proporcionan los métodos para el análisis de datos. A continuación se presenta el resultado de modelar un sistema de ciudades en México por medio de datos espaciales de polígonos urbanos y líneas de carreteras. Además, se exponen brevemente dos de sus principales propiedades estadísticas que pueden asociarse por medio del enfoque económico y de redes complejas: jerarquía por tamaño de ciudad y matriz de distancias ponderadas.

El sistema geoespacial de ciudades se representa por un grafo que incluye datos vectoriales en su topología (Figura 1). Los nodos son puntos de intersección en los segmentos de carreteras y un grupo de éstos exhiben atributos relacionados con áreas urbanas. Los arcos son las líneas que forman una ruta entre dos nodos y tienen el atributo de distancia.

Después de producir el grafo, se puede explorar la jerarquía por tamaño de ciudad y la matriz de distancias ponderadas para entender la estructura

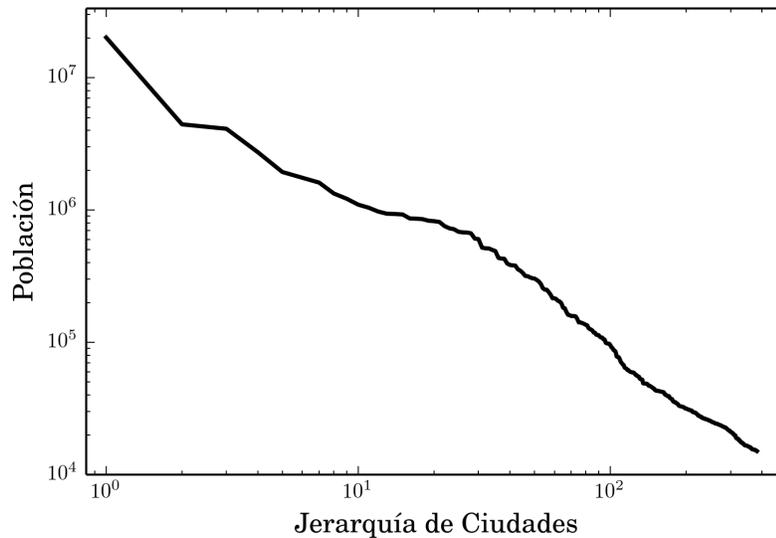


**Figura 1:** Red Geoespacial de Ciudades en México. El grafo se asocia con el principal componente conexo y tiene un número de nodos y arcos de 537, 740 y 540, 220 respectivamente. La imagen se generó por medio de librerías alternativas al SIG, particularmente Matplotlib y Networkx

del sistema urbano. La primera propiedad muestra la importancia de una ciudad con respecto a las otras por medio de su número de habitantes. Así, las ciudades se clasifican de mayor a menor tamaño. Esta clasificación se asocia directamente con una distribución acumulada que muestra un arreglo sesgado hacia valores extremos (Figura 2).

La Figura 2 indica la presencia de una gran cantidad de ciudades con menores tamaños de población y pocas ciudades con mayores tamaños. No obstante, este resultado indica una estabilidad en el agregado que oculta una alta volatilidad a nivel individual. Asimismo, esta propiedad deja de lado la importancia de la localización de ciudades. Por ejemplo, es desconocido el efecto de tamaños similares de ciudades vecinas en el crecimiento del sistema urbano. Por consiguiente, es fundamental complementar esta propiedad con su análisis espacial para reconocer asociaciones significativas dentro del enfoque económico.

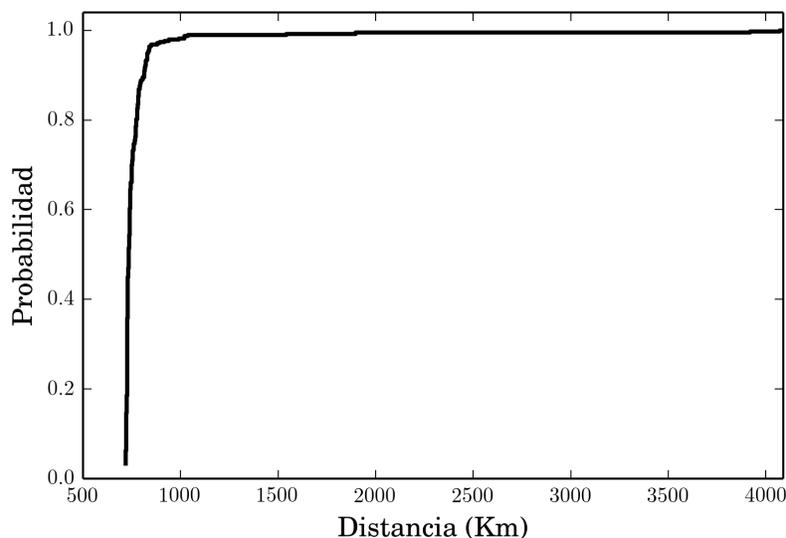
Por otra parte, la propiedad relacionada con la matriz de distancias pon-



**Figura 2:** Jerarquía por Tamaño de Ciudades en Logaritmos. Datos del Catálogo del Sistema Urbano Nacional, 2012 (SEDESOL y col., 2012). El número total de ciudades es de 384 del año 2010. La distribución que mejor se ajusta a los datos cuando se utiliza la prueba KS de bondad de ajuste es la *Pareto* (valor=0.0513, p-value=0.2586). Sus parámetros estimados por medio de MV son (forma=0.7837, localización=-40.3656, escala=15108.3656).

deradas exhibe dos clases de comportamientos: vecindarios cercanos entre la mayoría de las ciudades y proximidades lejanas en una minoría de ellas (Figura 3). Dicha propiedad toma en cuenta el atributo de localización de cada una de las ciudades y mide la distancia promedio de cada una de ellas con respecto a las demás por medio del camino más corto en ruta de carretera. Así, observamos una distribución acumulada sesgada que muestra 228 (60 %) ciudades con distancias promedio entre el rango de 718 (valor mínimo) a 1000 km y 154 (40 %) ciudades con valores mayores a 1000 km.

Este resultado sugiere una estructura desproporcionada en los costos de transporte cuando se usa el transporte por carretera. Por ejemplo, hay que tomar en cuenta aquellas ciudades localizadas en determinadas regiones (península de Baja California) porque aumentan y sesgan los costos del sistema (Lugo, 2015). Así, ciudades con distancias promedio bajas tienen mejores oportunidades de aglomerar actividades y distribuir sus productos a todo el sistema, lo que significa bajos costos de transporte y rendimientos

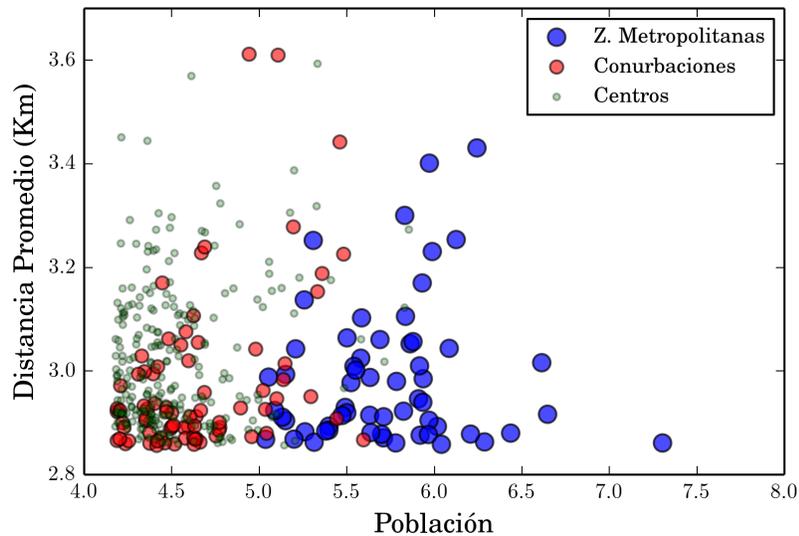


**Figura 3:** Distribución Acumulada de la Distancia Promedio por Ruta entre Ciudades. El computo de la distancia se realizó por medio del algoritmo de A\*(A estrella), el cual mide la distancia de una ciudad con respecto a las demás (Networkx, 2015). La distribución que mejor se ajusta a los datos por medio de la prueba KS es la *Pareto* (valor=0.0442, p-value=0.4346), con parámetros estimados (forma=2.7902, localización=-0.4559, escala=718.8955).

crecientes por ciudad. Si empleamos a la geografía económica, este resultado incorpora explícitamente costos de transporte asimétricos en el análisis y permite reconocer la importancia de localizarse cercana o lejanamente de las ciudades.

Por último, relacionando el tamaño y la distancia promedio por tipo de ciudad (zonas metropolitanas, conurbaciones y centros) (SEDESOL y col., 2012), encontramos resultados no esperados (Figura 4). Se observa una correlación positiva, aunque con coeficientes pequeños, que indica altos costos de transporte por carretera asociados con un elevado número de habitantes por ciudad. En particular, las conurbaciones muestran el valor más alto y significativo; mientras que las zonas metropolitanas y los centros indican valores pequeños y no significativos.

La Figura 4 sugiere que en el agregado el nivel de concentración de personas en las ciudades expresa altos costos de transporte en el sistema. Esta asociación se hace evidente en las conurbaciones, las cuales advierten



**Figura 4:** Diagrama de Dispersión entre la Población y la Distancia Promedio por Tipo de Ciudad. Los valores de ambos atributos están en logaritmos base 10. El coeficiente de correlación Spearman entre el tamaño y distancia promedio del total de ciudades es (valor=0.0087, p-value=0.8653). Las medidas de correlación por tipo de ciudad son Zonas Metropolitanas (valor=0.0503, p-value=0.704), Conurbaciones (valor=0.297, p-value=0.0080) y Centros (valor=0.0658, p-value=0.3042).

un probable proceso de centralización de actividades, mientras el resto de las ciudades presentan posibles mecanismos de difusión de recursos. Teóricamente se esperaría que la relación fuera inversa en donde las ciudades con mayor tamaño mostraran menores costos de transporte, sugiriendo la existencia de rendimientos crecientes a escala.

## DISCUSIÓN

El presente estudio explora un método que utiliza datos geospaciales para generar un grafo que representa una red espacial de ciudades conectadas por vías de carreteras. Una de las principales ventajas de nuestra aproximación es relacionar dicha red con las aportaciones teóricas de la economía. En particular, la economía urbana favorece a explicar la formación y localización de ciudades (nodos con atributos urbanos) y la geografía económica permite estudiar la dinámica del sistema (creación y crecimiento

de nodos urbanos y segmentos de carreteras) con base en mecanismos de interacción espacial (matriz de distancias ponderadas). Además, la red puede asociar importantes propiedades de sistemas urbanos que comúnmente no se analizan conjuntamente: la jerarquía por tamaño y la matriz de distancias ponderadas. Otro beneficio es la posibilidad de utilizar una gran variedad de algoritmos existentes para el análisis de redes complejas, por ejemplo medidas de centralidad y caminos más cortos. Sin embargo, hay que ser cauteloso con estos algoritmos porque la mayoría no incluyen explícitamente aspectos geográficos en sus cálculos. En consecuencia, la formación y utilización de una red geoespacial de ciudades proporciona importantes aportaciones para el desarrollo de estudios teóricos y empíricos interdisciplinarios de sistemas urbanos.

Los resultados encontrados en el caso del sistema de ciudades en México muestran una red espacial que contiene información oficial conseguida de forma libre en la Web. La mayor parte de dicha información ha sido organizada por medio de la tecnología SIG, la cual ha colaborado a disminuir el nivel de desorganización en los datos masivos. No obstante, el proceso de selección y traslado de datos que no tienen referencia espacial a valores referenciados es difícil. Además, dependiendo del estudio a realizar la red de ciudades puede modelarse utilizando otros modos de transporte, por ejemplo el transporte aéreo o marítimo. Por consiguiente, la red espacial de ciudades es flexible para añadir diferentes datos vinculados con los sistemas de transporte.

Una de las principales extensiones de esta clase de redes es el producir modelos nulos que ayuden a contrastar datos empíricos. Por ejemplo, crear configuraciones espaciales aleatorias para comparar la topología y funcionamiento de actuales redes de transporte entre ciudades. Por lo tanto, nuestra propuesta es ofrecer una guía para realizar estudios interdisciplinarios que vinculen teorías sociales existentes con mecanismos de crecimiento y cambio provenientes de sistemas físicos y biológicos.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo de la Universidad Nacional Autónoma de México por los recursos y servicios proporcionados por la Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación (DGTIC) (número de proyecto SC15-1-S-46).

## REFERENCIAS

- Abdel-Rahman, Hesham M y Alex Anas (2004). "Theories of systems of cities". En: *Handbook of regional and urban economics*. Ed. por J.V. Henderson y J-F Thisse. Elsevier.
- Alonso, W. (1964). *Location and Land Use*. Harvard University Press.
- Barthélemy, M. (2011). "Spatial Networks". En: *Physics Reports* 499.
- Batty, M. (2005). *Cities and complexity: understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals*. MIT Press.
- (2006). "Hierarchy in cities and city systems". En: *in Hierarchy in Natural and Social Sciences*. Ed. por D. Pumain. Springer.
- (2008). "The Size, Scale, and Shape of Cities". En: *Science* 319.5864, pág. 769.
- (2014). *The New Science of Cities*. MIT Press.
- Berry, B.J.L. (1964). "Cities as Systems within System of Cities". En: *Papers in Regional Science* 13.1, págs. 7-205.
- Bettencourt, L.M. (2013). "The Origins of Scaling in Cities". En: *Science* 340.6139, págs. 1438-1441.
- Christaller, Walter (1933). *Central places in southern Germany*. Prentice-Hall.
- Clauset, A. y col. (2009). "Power-Law Distributions in Empirical Data". En: *SIAM Rev.* 51.4, págs. 661-703.
- De Smith, Michael John y col. (2007). *Geospatial analysis: a comprehensive guide to principles, techniques and software tools*. Troubador Publishing Ltd.
- Ducruet, C. e I. Lugo (2013). "Cities and Transport Networks in Shipping and Logistics Research". En: *The Asian Journal of Shipping and Logistics* 29.2, págs. 145-166.
- Einav, L. y J. Levin (2014). "Economics in the age of big data". En: *Science* 346.6210.
- Fujita, M. y J-F Thisse (2002). *Economics of Agglomeration: Cities, Industrial Organization, and Regional Growth*. Cambridge University Press.
- Fujita, M. y col. (2001). *The spatial economy: cities, regions, and international trade*. MIT Press.
- Henderson, J.V. (1974). "The Size and Type of Cities". En: *American Economic Review* 64, págs. 640-656.
- (1980). "Community development: The effect of growth and uncertainty". En: *American Economic Review* 70, págs. 894-910.
- (1988). *Urban Development: Theory, Fact, and Illusion*. Oxford University Press.
- INEGI (2014). *Topografía, Datos Vectoriales escala 1:1000000 – descarga*. <https://goo.gl/mSZW5K>. [Online; access Dic, 2014].

- Krugman, Paul R (1996). *The self-organizing economy*. Blackwell Publishers.
- Kurant, M. y P. Thiran (2006). "Extraction and analysis of traffic and topologies of transportation networks". En: *Physical Review E* 74, pág. 036114.
- Leek, J.T. y R.D. Peng (2015). "What is the question?" En: *Science* 347.6228, págs. 1314-1315.
- Lösch, August (1944). *Die räumliche ordnung der wirtschaft*. Verlag von Gustav Fischer.
- Lugo, I. (2013). "Spatial Externalities Approach to Modelling the Preferential Attachment Process in Urban Systems". En: *European Conference on Complex Systems 2012*. Ed. por T. Gilbert y col. Springer.
- (2015). "Interplay between Maritime and Land Modes in a System of Cities". En: *Spatial Structures and Time Dynamics*. Ed. por César Ducruet. Routledge (próxima publicación).
- (2017). *Red Espacial y Sistema de Ciudades*. <https://osf.io/upf4e/>. [Online, access Feb, 2017.DOI: 10.17605/OSF.IO/UPF4E].
- Lugo, I. y C. Gershenson (2013). "Decoding Road Networks into Ancient Routes: The Case of the Aztec Empire in Mexico". En: *COMPLEX 2012*. Ed. por K. Glass y col. Springer.
- Marshall, Alfred (1927). *Principles of economics: an introductory volume*. Macmillan.
- Massey, F.J. (1951). "The Kolmogorov-Smirnov Test for Goodness of Fit". En: *Journal of the American Statistical Association* 46.253, págs. 68-78.
- Mills, E.S. (1967). "An aggregative model of resource allocation in a metropolitan area". En: *American Economic Review* 61, págs. 197-210.
- Networkx (2015). *Algorithms, Shortest Paths*. <https://goo.gl/2bgRss>. [Online, access Jul, 2015].
- Newman, M. y col. (2006). *The structure and dynamics of networks*. Princeton University Press.
- Okabe, A. y K. Sugihara (2011). *Spatial analysis along networks: statistical and computational methods*. Wiley & Sons, Ltd.
- Okave, A. y K. Sugiara (2014). *Spatial Analysis along Networks: Statistical and Computational Methods*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Pumain, Denise (2006). "Alternative explanations of hierarchical differentiation in urban systems". En: *Hierarchy in natural and social sciences*. Springer, págs. 169-222.
- Redding, S.J. (2010). "The empirics of the new economic geography". En: *Journal of Regional Science* 50.1, págs. 297-311.
- Rodrigue, Jean-Paul y col. (2013). *The geography of transport systems*. Routledge.

- Samuelson, P.A. (1952). "The transfer problem and transport costs: The terms of trade when impediments are absent". En: *Economic Journal* 62, pág. 278.
- SEDESOL y col. (2012). *Catálogo. Sistema Urbano Nacional 2012*. SEDESOL, SEGOB y CONAPO.
- Sornette, D. (2004). *Critical Phenomena in Natural Sciences: Chaos, Fractals, Selforganization and Disorder: Concepts and Tools*. Physics and astronomy online library. Springer Berlin Heidelberg.
- Sornette, Didier (2009). "Probability distributions in complex systems". En: *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. Springer, págs. 7009-7024.
- Thünen, Johann Heinrich von (1826). *Der isolierte staat*. Pergamon Press.
- Wilson, A. y J. Dearden (2011). "Tracking the Evolution of the Populations of a System of Cities". En: *Population Dynamics and Projection Methods*. Ed. por John Stillwell y Martin Clarke. Vol. 4. Understanding Population Trends and Processes. Springer Netherlands, págs. 209-222.
- Wilson, A.G. (2000). *Complex Spatial Systems: The Modelling Foundations of Urban and Regional Analysis*. Prentice Hall.
- (2002). "Complex spatial systems: Challenges for modellers". En: *Mathematical and Computer Modelling* 36.3, págs. 379 -387. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0895-7177\(02\)00132-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0895-7177(02)00132-2). URL: <https://goo.gl/yEcd5H>.
- Yamins, D. y col. (2003). "Growing Urban Roads". En: *Networks and Spatial Economics* 3.1, págs. 69-85.
- Zhonga, C. y col. (2014). "Detecting the dynamics of urban structure through spatial network analysis". En: *International Journal of Geographical Information Science* 28.11, págs. 2178-2199.
- Zwillinger, Daniel y Stephen Kokoska (1999). *CRC standard probability and statistics tables and formulae*. CRC Press.

⊙ *Esta es una página en blanco.* ⊙

## INFRAESTRUCTURA URBANA BASADA EN SISTEMAS COMPLEJOS ADAPTATIVOS

*Liliana Sosa\**

### INTRODUCCIÓN

LAS ciudades y su infraestructura nos representan como sociedad y son un claro reflejo del desarrollo tecnológico y de la organización social que como humanidad hemos alcanzado. Las urbes crecen en complejidad a la par de los adelantos en las maneras de comunicarnos y en las tecnologías de diversa índole. La magnitud que han alcanzado las ciudades ha provocado la necesidad de contar con estrategias en el diseño de la infraestructura urbana que evite el colapso del sistema ciudadano. Para poder enfrentar los retos que esto implica para los diseñadores del desarrollo urbano, es indispensable identificar las ciudades desde el enfoque de la complejidad, para poder dar soluciones a problemas en contextos complejos y cambiantes. La naturaleza organizada en sistemas complejos adaptativos ha desarrollado diseños y estrategias increíblemente eficaces para el desarrollo y permanencia de sus mismos sistemas, por lo que un modelo de diseño basado en las dinámicas, patrones y procesos que los sistemas complejos adaptativos comportan, nos puede dar las pautas para diseñar de una manera eficiente y efectiva, a las ciudades y su infraestructura.

#### LAS CIUDADES COMO SISTEMAS COMPLEJOS Y SU INFRAESTRUCTURA COMO COMPONENTE ESENCIAL

Las ciudades son sus habitantes, sus edificios, calles, objetos de uso, su geografía y todas las cosas que se encuentran en ella. Al igual que los sistemas complejos adaptativos biológicos, las ciudades son entidades auto-referentes, se autoorganizan y regeneran a sí mismas. En las ciudades la percepción que se tiene de ellas las transforma y viceversa.

---

\*Universidad Autónoma de Nuevo León, México

La infraestructura urbana es un innegable reflejo de la identidad de una ciudad, pero además, es el reflejo de un desarrollo y evolución de una unidad sistémica colectiva, ¿quién diseña la infraestructura urbana? Ciertamente el crecimiento de las ciudades es marcado por la pauta de los desarrolladores urbanos, junto con los arquitectos y diseñadores, pero desde la perspectiva de la complejidad, es la ciudad misma, entendida como sistema autorreferente, la que va auto diseñando su infraestructura, por lo que es racional proponer que para lograr un desarrollo más eficiente y eficaz por parte de los encargados del desarrollo urbano, es necesario basar el diseño de la infraestructura citadina en la lógica de “lo viviente”, es decir, de la naturaleza y sus sistemas complejos. “La naturaleza posee una fuerte tendencia a estructurarse en forma de entes discretos excitables que interactúan y que se organizan en niveles jerárquicos de creciente complejidad, por ello, los sistemas complejos no son de ninguna manera casos raros ni curiosidades, sino que dominan la estructura y función del universo... los sistemas complejos (sean de tipo físicos, químicos, biológicos, sociales, etc.) no implica una innumerable e inclasificable diversidad de conductas dinámicas diferentes.” (Miramontes, 1999). Las ciudades son una gran matriz social, un sistema complejo adaptativo que puede ser observado bajo el enfoque de la complejidad con la intención de descifrar sus juegos y procesos, para así, sintetizar esta información en estructuras tangibles que agilicen de manera óptima su crecimiento y desarrollo, minimizando pérdidas materiales y energéticas de cualquier índole.

Tratemos pues, de representar a una ciudad como un sistema complejo y determinar el rol que juegan en ella cada uno de sus componentes en conceptos sistémicos, para luego marcar directrices de diseño para las ciudades, basándonos en las reglas de los sistemas complejos adaptativos. Debemos considerar que la geometría de la infraestructura urbana, desde su distribución hasta sus formas, son resultado de un proceso sistémico, con la particularidad de que los sistemas sociales, contenidos en una ciudad, son considerados sistemas autopoieticos de tercer orden, es decir, están conformados por la interacción de subsistemas que por sí mismos son autopoieticos y estos a su vez, también.

En el caso de las sociedades, la autorreferencia que se da, es por la interacción humana, por lo cual, lo que ocurra con los individuos en lo particular, se refleja en la cultura e identidad de esa misma comunidad, por ende, su ciudad, dándose un bucle de retroalimentación regulador en el sistema (Hofstadter, 2008).

Son los objetos y edificaciones hechas por el hombre, una síntesis de in-

formación de las ciudades, “Podrían los objetos entenderse como índices para la lectura profunda de la psique de los habitantes, o en otro sentido podrían operar como extensiones de la vida interior de los habitantes, como brazos que se extienden hacia el mundo para expresarse y conocer de él. Estos ‘órganos sensoriales’ de la psique, ciertamente establecen una de las funciones más importantes del habitar, que es establecer los límites físicos y simbólicos del ámbito de la vida de las personas”(Narváez Tijerina, 2004). Esto cobra relevancia para fines de diseño urbano, en el sentido de la importancia de que lo que se produce y realiza en la infraestructura de una región o ubicación particular, es resultado y reflejo del imaginario urbano de su sociedad y de las circunstancias específicas de ese entorno.

Lo que buscamos es acortar la brecha entre información y significados, para que así, esto pueda ser tangible en las formas de la infraestructura urbana, dado que “en las sociedades, en los organismos, en las células, el pegamento mágico es la información... la información es lo que dirige la energía que se necesita para construir y reponer las estructuras que las corrientes entrópicas del tiempo erosionan sin cesar. Y esta información no es una «fuerza» misteriosa, sino algo físico... la información es una forma estructurada de materia o energía cuya función general es conservar y proteger estructuras.” (Wright, 2005). En la sociedad, los significados son leídos en información contenida en palabras, símbolos, signos, objetos, edificios y por supuesto, toda la infraestructura urbana.

Los objetos y edificaciones creados y usados por el hombre dentro de una ciudad, pueden interpretarse en un sistema como elementos con funciones de portadores de información y también, como receptores de referencias del medio. ¿Cómo es que se van modificando las cosas y evolucionando en un sistema social como éste? A continuación trataremos de describir los procesos de desarrollo y evolución de las urbes.

#### LOS PROCESOS Y MORFOGÉNESIS EN LAS URBES

La evolución de la humanidad y de la cultura se ha dado de una manera más o menos previsible, la tendencia a la complejidad la da la naturaleza humana y se ha visto en los tipos de organización social, que van desde las bandas, tribus, jefaturas y los estados, pasando por matices como salvajismo, barbarie y civilización, cobrando relevancia que a la par de estas estructuras sociales, la tecnología y los espacios que se habitaban, iban creciendo en complejidad.

El funcionamiento, evolución y transformación de las sociedades a lo

largo de la historia, marca tendencias claras, que llevan a organizaciones y tecnologías más complejas. Los procesos que impulsan este desarrollo son, entre otros, la inclinación humana al intercambio de recursos, el respeto por los poderosos, así como la continua búsqueda de posición social, lo que conlleva el impulso a la evolución tecnológica y cultural, debido a que “hacer algo que resulte ampliamente adoptado y elogiado es una forma segura de elevar la propia posición.” (Wright, 2005):40.

¿Qué es la complejidad social? Una definición exacta es difícil de darse, pero podemos partir desde el punto de vista de la energía para describirla, con ayuda de las nociones que da Robert Wright: “la cultura se desarrolla cuando ha aumentado la cantidad de energía aprovechada por el hombre per cápita y por año. . . o cuando ha aumentado la ineficacia de los medios tecnológicos de aplicar esta energía... la eficacia con la que la energía se captaba y aplicaba no era solo una causa, o un índice, sino la causa y el índice de la evolución cultural”(Wright, 2005):361, así pues, la capacidad del manejo de energía por las sociedades y sus ciudades, nos puede dar una guía de que tan complejas son. La infraestructura urbana pues, debe estar dispuesta y configurada de tal modo, que se puedan optimizar los recursos energéticos del contexto en el que se encuentra inmersa.

Por otro lado, además de la dimensión fenomenológica sociocultural que se debe considerar para dar sentido formal a la infraestructura urbana, consideremos aspectos topológicos de la infraestructura citadina, hay muchos sucesos que ocurren de acuerdo a cómo están interconectados los componentes de un sistema y la distribución geoespacial de la infraestructura urbana, además de efecto, es también causal de la manera en que se desarrollan las urbes, para observar más a detalle cómo derivan las ciudades a partir de la topología de red de su infraestructura, se realizó un experimento en el simulador digital de construcción de ciudades SimCity<sup>1</sup>, creando ciudades virtuales, a base de distintas estructuras de redes, con la finalidad de comprobar resultados para identificar si manipulando ciertos elementos de los sistemas se puede lograr un fin determinado, en este caso, el desarrollo de una ciudad. Asimismo, se pretendía observar cómo presentan los patrones de comportamiento de los sistemas complejos. Los tipos de red que interconectaban la infraestructura en las ciudades virtuales que se estudiaron, fueron 6: bus, árbol, anillo, estrella, libre de escala y concentrada.

Los parámetros para medir el desarrollo y evolución de las ciudades se

---

<sup>1</sup>Software de simulación para la creación y gestión de ciudades virtuales, desarrollado por Maxis/Electronic Arts.

basaron en las mediciones que hace el mismo simulador, los que principalmente se tomaron en cuenta son: la popularidad de las ciudades, las zonas con mayor deseabilidad, los parámetros de contaminación, educación, tráfico y crecimiento en la población en zonas habitacionales, comerciales e industriales.



**Figura 1:** imágenes de las pantallas de secciones de las diferentes ciudades virtuales construidas, las líneas azules representan los caminos y calles de la ciudad, y en cada una están dispuestas en diferente tipo de red. El tono de azul indica la cantidad de tráfico.

Lo que pudimos observar, es cómo las ciudades van auto organizándose por autorreferencia hacia una estructura como la de los sistemas complejos adaptativos en general, es decir, libres de escala<sup>2</sup>, en el juego son los consejeros expertos los que van pidiendo ítems, según las necesidades que se van registrando, si el gobernador (el jugador) se los proporciona, las ciudades tienden a desarrollarse, de lo contrario esto no sucede y se pierde el crecimiento y calidad de vida de los habitantes, sin embargo, las necesidades que surgen conforme transcurre el tiempo y se multiplican las interacciones, el ritmo de desarrollo y calidad de vida, se ven directamente afectados por las condiciones iniciales y modos de comunicación, que en este caso, está determinado por la disposición de los nodos en la red.

Observamos por ejemplo, el fracaso del desarrollo por el colapso de las

<sup>2</sup>En matemáticas y física, una red libre de escala o de “mundo pequeño”, es un tipo de red en donde hay muchos nodos poco conectados y pocos multiconectados; la mayoría de los nodos no son vecinos entre sí; sin embargo la mayoría de los nodos pueden ser alcanzados desde cualquier nodo origen a través de un número relativamente corto de saltos entre ellos.

vías de comunicación en la ciudad con la estructura de red tipo anillo, y la lentitud del desarrollo en la red centralizada, en contraste con el éxito de la red de bus, por su parte, la ciudad libre de escala, presentó un auge que se estancó, tal vez porque la infraestructura llegó a su límite y se reguló el índice de crecimiento para no sobrepasar lo que se podía contener con la calidad de vida de alto nivel que se alcanzó, en esta ciudad se requerirían atractores de expansión, como nodos capitales-satélites para seguir creciendo.

Es interesante ver cómo las sociedades y sus ciudades presentan ciertas similitudes con los seres vivos. Aquí lo importante es ver lo que influye para el diseño de su infraestructura: tomar en cuenta la “programación” de los individuos, es decir, lo que culturalmente identifican como propio; el diseño de su densidad y vías de comunicación, así como el manejo y almacenamiento de datos; la memoria colectiva que proporciona mecanismos de identificación de símbolos y la organización fractal con nodos centrales, ayuda en términos organizacionales para una fina especialización en ciertas tareas.

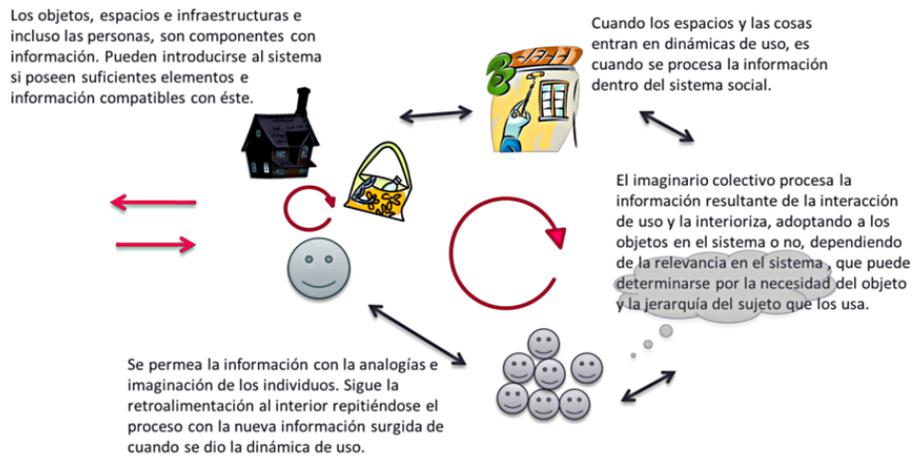
Para diseñar a las ciudades basándose en los sistemas complejos, comparemos las semejanzas de las urbes con los sistemas complejos biológicos y tratemos de equiparar a los agentes y componentes en cada sistema, para poder unificar lenguajes y así echar mano de la teoría de sistemas. Tenemos pues, que se pueden reconocer elementos básicos dentro de los sistemas, de acuerdo a su función en los mismos, y que están presentes en todos ellos, de los principales que hemos podido distinguir en el estudio de distintos tipos de sistemas son: el tipo de organización y forma estructural de interconexión de agentes (tipo de red); la morfogénesis y procesos; y los componentes generales clasificados por sus funciones dentro del sistema: procesador, interfaces, vías de comunicación, actuadores, códigos y lenguajes.

El tipo de organización autorreferencial en las ciudades, al igual que en los sistemas biológicos, se interpreta como autonomía y concepción circular de los procesos, ausencia de finalidad referente al entorno, solo referente a sí mismo, por lo que debemos entender que la infraestructura dentro de la ciudad, debiera abonar a dar identidad y fortaleza al sistema ciudadano, asimismo, la morfogénesis y procesos, se centran en el bricolaje y la selección natural, así como en las estrategias de la teoría de juegos sobre la aditividad no nula<sup>3</sup>. Se utilizan los elementos disponibles, se combinan y se generan

---

<sup>3</sup>Cuando dos entidades orgánicas pueden mejorar recíprocamente sus perspectivas de supervivencia y reproducción, están en una situación de suma no nula; si sus intereses son opuestos, la dinámica es de suma cero (Wright, 2005). Es decir, los juegos de suma no nu-

cambios por la retroalimentación al sistema y se vuelve más complejo, lo que equivale a más adaptabilidad, por ende, con mejores oportunidades de permanencia. Es importante pues, hacer que los espacios urbanos y su infraestructura, fomenten el flujo de intercambios beneficiosos entre ciudadanos, el sistema y los subsistemas de la ciudad.



**Figura 2:** Diagrama de dinámica de interacciones entre los componentes e información dentro de un sistema social, y la recursividad de acciones internas que lo transforman.

Hay dos factores cruciales que hacen que un sistema sea autorreferente y adaptativo, que ocurren en los distintos tipos de sistemas complejos: la retroalimentación y la percepción, abstracción y categorización de información. Esto tiene lugar en lo que podría denominarse procesador, que es donde acontece la interiorización de la información. En el caso de las sociedades, existe la cultura y lo que es llamado cerebro invisible, imaginario o memoria colectiva, que es influenciada por los individuos y viceversa, por lo que el lenguaje y la información técnica y simbólica que reflejen los espacios diseñados, deben estar representados con un lenguaje que pueda ser decodificado por la cultura de la sociedad al que pertenecen.

la, son una dinámica en donde conviene la cooperación, ya que de alguna manera traerá beneficios.

## DISEÑO DE LA INFRAESTRUCTURA URBANA BASADO EN LAS TEORÍAS DE SISTEMAS

A pesar de las diferencias que existen entre los distintos tipos de sistemas, los modelos de funcionamiento son denominadores comunes en todos ellos, por lo que podemos echar mano a las teorías que describen a los sistemas para el diseño de sistemas, como los de las ciudades. A continuación trataremos de sintetizar en algunas directrices generales, como debe ser el diseño de la infraestructura urbana, desde la perspectiva de la complejidad.

*En cuanto a estructura, cantidad y distribución:*

Las características tecnológicas, la cantidad y la distribución de los componentes de la infraestructura urbana, son factores decisivos en el desarrollo y diseño de una ciudad.

- a) La cantidad de elementos intervenidos o diseñados de la infraestructura urbana es directamente proporcional a la velocidad de los cambios o transformaciones, entre más frontera e interconexiones de vías de comunicación, el desarrollo es más rápido, aunque el flujo de información sea óptimo, si no hay apertura a nodos satélites, el desarrollo se estanca.
- b) Los costos de intercambio de datos, materia o energía, son inversamente proporcionales a los beneficios obtenidos por el sistema urbano. La distancia, velocidad y calidad de las vías del flujo de datos, están directamente relacionadas con los costos de intercambio de información, asimismo, influye la cantidad de individuos que se agrupan en densidades altas. Acorde con la teoría de juegos que analizamos en el libro "nadie pierde", tenemos que mayor volumen y densidad demográficos, es igual a avance tecnológico más rápido.
- c) Cuando las vías de conexión y de comunicación de una ciudad son deficientes, descentralizar el sistema es una buena opción.
- d) Las redes de distribución de los subsistemas y componentes de la infraestructura urbana con propiedad del 'mundo pequeño' (redes libres de escala) eficientizan el flujo de información y el encuentro de datos entre los componentes y agentes de las ciudades.
- e) Lo modular de la red de las infraestructuras urbanas ofrece una mejor organización y comunicación entre elementos especializados, lo que facilita que los módulos puedan evolucionar de una manera un tanto independiente; esto permite enfocar la manipulación de partes más específicas de la ciudad por parte del diseñador, además, evita que se propaguen fallas o daños de un módulo a otras partes de la urbe. Las

redes centralizadas o altamente jerárquicas, son tan frágiles, que si se dañan algunos elementos, las consecuencias resultarían un desastre para toda la ciudad.

- f) Es deseable que haya heterogeneidad en el número de conexiones que unirán los elementos entre sí, es decir que existan elementos multi-conectados, medio conectados y poco conectados, así se podrá echar mano a los componentes más convenientes, según su conexión para la introducción de información y propagación de ésta por el sistema.
- g) La capacidad de adaptabilidad y multifuncionalidad de cada componente de la infraestructura urbana, agrega complejidad, así como la flexibilidad del sistema, ante los cambios y perturbaciones del entorno.
- h) Las características de las propiedades de la tecnología empleada en el diseño de la infraestructura urbana y sus componentes, deben estar en concordancia con los subsistemas de la misma, ya que, por ejemplo, de nada sirve percibir o manejar mucha información, que un procesador sea incapaz de procesar, para dar una respuesta, ni resulta eficiente contar con vías de comunicación sobradas para la calidad y cantidad de datos que transitan en ella y viceversa.

*En cuanto a propiedades formales y funciones:*

- i) Desde el punto de vista sistémico, la función principal de la infraestructura urbana y de los objetos y espacios dentro de una ciudad, es llevar y traer información en materia o energía, en general, la optimización de tecnologías de comunicación, transmisión y almacenamiento de información, hacen que la sociedad tenga una especie de memoria o experiencia que la llevan a una evolución, que análogamente con los seres vivos, la hace más apta para la supervivencia. Los objetos no son solo cosas, la manera de usarlos y los significados que les asignamos por sus formas o funciones, generan datos e información que retroalimentan al sistema en el que están inmersos, lo que conlleva a transformaciones, por lo que el contexto espacio temporal donde se encuentren los objetos, debe estar relacionado con su forma, función y significado.
- j) Al pretender introducir un objeto con una estética diferente o ajena a la información manejada en una ciudad específica, para formar parte de su identidad, se ha observado que los de fuerte "genética cultural", permanecen más en el imaginario colectivo, que los más estéticos con un lenguaje ajeno a la matriz (Mercado y Sosa, 2008).

- k) El programa del propio sistema autorreferente, en este caso la cultura, es más poderoso para dirigir a la ciudad a un comportamiento de desarrollo específico, que cualquier perturbación externa que se pretenda introducir, esto cobra especial relevancia a la hora de diseñar un objeto autorreferente, ya que nos dice que costaría menos esfuerzo moldearlo hacia un fin, si se hace introduciendo información a nivel cultural, que haciéndolo con atractores u objetos que describan un uso determinado.
- l) Aunque el flujo de información sea óptimo, la infraestructura urbana debe tener apertura a las periferias de la ciudad, de lo contrario, el desarrollo se estancaría.
- m) La comunicación eficiente y eficaz entre los individuos significará una alianza más fuerte, o fuerza de unión en una ciudad, por lo que la infraestructura citadina debe fomentar esta comunicación y tener fuerte carga de significación e identidad que refuerce la cohesión social.
- n) Cada componente o elemento de la infraestructura urbana, significa algo para el sistema y sus ciudadanos, y como se observa en los sistemas complejos, "la ambigüedad introducida por la polisemia resulta ser una propiedad enormemente útil: en lugar de introducir ineficiencia, hace de hecho la asociación semántica mucho más fácil y fluida." (Solé, 2009):204.
- o) Entre más inteligible sea el código de información de los objetos y los espacios, es decir, que la información sea fácilmente procesable para la obtención de significados, hay más posibilidades de que se interiorice eficientemente y se produzcan patrones de respuesta.
- p) La interdependencia entre los componentes de un sistema, genera un comportamiento condescendiente entre las partes, por lo que la infraestructura urbana debiera promover un intercambio beneficioso con otros componentes, subsistemas e individuos de una ciudad, como una estrategia o mecanismo para aumentar complejidad. Fomentar simbiosis entre los componentes o individuos da mejores resultados para el sistema.
- q) El tiempo de exposición y las repeticiones de la información dentro de los objetos y espacios dispuestos como perturbadores dentro de una ciudad, también influyen como perpetradores del cambio y la rapidez del mismo.

- r) La incomunicación y la desconfianza son factores que se deben reducir o eliminar en la gestión e implementación de la infraestructura urbana, si se quiere que los individuos adopten las mismas e interactúen con ella para un beneficio común: Se desconfía de las decisiones que se toman lejos de nosotros.

## CONCLUSIONES

Diseñar un objeto autorreferente, que se autorregule y organice de acuerdo a sus mismos componentes y en reacción al entorno, implica reconocer a los agentes, sistemas y subsistemas que forman a dicho objeto; sus interacciones con el medio (Sosa, 2012). En el caso que tratamos, el objeto autorreferente es una ciudad, pero dada la fractalidad de los sistemas complejos como éste, incluso la misma infraestructura urbana, puede ser considerada de igual manera el objeto de diseño, solo cambiaríamos el tipo de componentes, pero las estrategias de diseño son las mismas. Vale decir pues, que para los sistemas de cualquier clase, el tipo de información que fluye en él y que contienen sus componentes, así como su contexto, son las nociones relevantes para describirlos en materia de diseño, poniendo especial atención a las unidades que se consideran atómicas en los diferentes campos de actividad del sistema. Por ejemplo “en los contextos formales, las unidades del discurso son dígitos, pasos de programa, elementos de tiempo o de distancia, mientras que en la vida cotidiana son acciones básicas, detalles argumentales y elementos de historias. A diferencia de estas últimas unidades, que son de orden superior, ni la matriz arbitraria de píxeles en grises en una pantalla de televisión, ni los detalles de la inocente gesticulación de la niña, ni las secuencias de dígitos más o menos aleatorias en una guía telefónica, significan cosas para nosotros, ni en sí ni por sí mismos. Sin un arraigo natural en un contexto humano reconocible.” (Allen Paulos, 2009):137. Para diseñar a sistemas como estos, se necesita un rol de observador de un orden superior y podemos tratar de cerrar la brecha existente entre los significados y la información en diferentes contextos echando mano de las nociones de la teoría de la información: “El hueco existente entre significado e información (de la clase que sea) se cierra hasta cierto punto si se concibe la segunda como una destilación del primero, destilación que para germinar necesita la tierra y el agua del contexto.” (Allen Paulos, 2009):139.

El enfoque sistémico para el diseño de ciudades, representa una perspectiva a un nivel complejo que permite hacer propuestas estratégicas integrales, apegadas a los contextos, involucrando espacio y tiempo. El dise-

ño en los objetos autorreferentes, como las ciudades y su infraestructura, se centraría en la programación de los sistemas, diseñar e implementar perturbaciones y atractores que generen comportamientos y conductas, reconocer las dinámicas de la información y reconocer patrones de experiencia del sistema y sobre todo, tener empatía con éste, entendiendo sus condiciones y finalidad hacia sí mismo.

## REFERENCIAS

- Allen Paulos, John (2009). *Érase una vez un número*. Barcelona: Tusquets editores.
- Hofstadter, Douglas (2008). *Yo soy un extraño bucle*. México: Tusquets editores.
- Mercado, M. y L. Sosa (2008). *El objeto significativo*. AEDIFICARE, UANL.
- Miramontes, O. (1999). "Los sistemas complejos como instrumentos de conocimiento y transformación del mundo". En: *Perspectivas sobre la teoría de sistemas*. Ed. por Santiago Ramirez. UNAM-Siglo XXI.
- Narváez Tijerina, AB (2004). *Teoría de la arquitectura*. México DF: Editorial Trillas.
- Solé, R. (2009). *Redes Complejas: Del genoma a Internet*. Barcelona: Tusquets.
- Sosa, Liliana (2012). *Diseño basado en sistemas complejos adaptativos*. UANL, México.
- Wright, R (2005). *Nadie pierde*. Barcelona: Tusquets.

## IDENTIDAD DE LAS CIUDADES DESDE LA COMPLEJIDAD

Mercedes Mercado\*

### INTRODUCCIÓN

EL presente capítulo, pretende explicar y resumir los hallazgos de una investigación sobre identidad; entendida como un proceso para separar y distinguir a un sistema (en este caso la ciudad) de su entorno y poder analizar cómo éstas adquieren su forma. A ésta morfogénesis citadina le hemos denominado, Proceso de Identidad.

Se hace una descripción de cuál puede ser el fenómeno de causación formativa en una ciudad, identificándola mediante sus objetos urbanos. Las interrogantes iniciales son ¿qué causa que al percibir ciertos objetos urbanos podemos reconocer la ciudad a la que pertenecen? ¿qué hace que una ciudad se diferencie de otra? ¿Son los objetos urbanos *per se*, los que otorgan esa distinción, o es quién los observa?

La razón para adentrarnos incipientemente a estos cuestionamientos cualitativos, observando modelos con enfoques desde la complejidad y sistémicos, es porque, las representaciones del ejercicio de diseñar por una parte son subjetivas y abstractas, pero por otra se requiere de modelos científicos que expliquen la naturaleza de éstos fenómenos formativos. Si bien, ya existen estudios, de tipo social-culturales, que abordan la identidad en las ciudades, éstos no aproximan a explicar toda la realidad de procesos tan complejos que involucren creatividad como las disciplinas de arquitectura y objetos urbanos.

El método del pensamiento complejo de Edgar Morin (Morin, 1990) y el planteamiento sistémico del sociólogo alemán Niklass Luhmann desarrollado hacia la segunda mitad del siglo pasado, podría dar respuesta a este tipo de planteamientos para el proceso de identidad en ciudades y de objetos urbanos de una manera holística. La intención no es sólo explicar lo que

---

\*Facultad de Arquitectura, Universidad Autónoma de Nuevo León

da forma a las estructuras ciudadanas, sino explicar una parte de la realidad que describa el proceso de diseño en los sistemas en general, para posteriormente, exponer lo que identificaría a las ciudades de una manera específica. Para este estudio se utilizó una metodología basada en escalas de observación de sistemas isomorfos haciendo analogías de su estructura operativa, ya que el pensamiento complejo y sistémico permite deducir que en la naturaleza, en lo social y cultural ocurren procesos formativos similares. Estos niveles son los siguientes:

- Formación de la identidad en organismos naturales (a nivel genético, celular, biológico)
- Formación de la identidad en sistemas físicos (termodinámicos)
- Formación de la identidad individual de cómo surge la conciencia (a nivel neurológico, y psicológicos)
- Formación de la identidad en las ciudades (socio-cultural y colectiva)

#### CONSIDERACIONES SOBRE LA IDENTIDAD Y LA CIUDAD COMO UNIDAD COMPLEJA

##### *Delimitando qué es la identidad desde el punto de vista de la complejidad*

Uno de los primeros puntos es definir lo que es la identidad: Niklass Luhmann (Luhmann, 1996) la define como *Unidat multiplex* o diferenciación del entorno. Esto es, cómo un sistema se diferencia no sólo de otro sistema sino de su entorno: la unidad y la diferenciación es igual a la distinción. El sociólogo francés Edgar Morin a fin de encontrar un método que pudiera unificar epistemológicamente todas las disciplinas, se plantea la interrogante en su quinto compendio de su método (Morin, 2003), ¿qué es lo que le da identidad a la humanidad? Él describe la identidad a partir de hacer análisis desde el nivel individual, de la biología, la psicología, el establecimiento de las sociedades, hasta lo que son las meta-sociedades, pasando por el alma y espíritu no solo del individuo, sino de colectividades. Así que él define la identidad como una *Pluralidad de la Unidat*.

#### ELEMENTOS DE ANÁLISIS DE LA IDENTIDAD DE UNA CIUDAD

Analizando algunas ciudades de México, Estados Unidos, Inglaterra y del centro de Europa principalmente, se encontraron cuatro elementos que intervienen para que sea posible el fenómeno de la identidad en las ciudades, estos son:

**Relación.** Esto es la vinculación interna y externa de los componentes que existen dentro del sistema ciudadano. Es decir, la interacción que existe entre las partes y dinámicas. Las partes serían los objetos urbanos y las dinámicas las prácticas y su relación con los urbanitas. Se tendrían que analizar el tipo de objetos, edificios y monumentos, medios de transporte, actores sociales, personajes famosos, hitos históricos, platillos, festividades, cultos, etc. Todos aquellos objetos que perturban al sistema, se les puede llamar atractores que identifican<sup>1</sup> o bien agentes morfológicos<sup>2</sup>, éstos brindan estabilidad al sistema.

**Pertenencia.** El elemento de pertenencia no se refiere tan específicamente al lugar y territorio donde ocurre la identidad, sino al espacio de apropiación de una comunidad y la personalidad que adquiere éste. Todo proceso de identidad está situado en un tiempo y espacio en dónde diferenciarse. Estos límites, escalas y fronteras ocurren en territorio delimitado, el cual puede estar localizado o deslocalizado. El mismo sistema o un observador ajeno a este determinan la frontera. Uno de los aspectos a considerar es cómo sucede esta apropiación o desprendimiento territoriales. Las variables que hemos tomado en cuenta para determinar la apropiación del espacio, es sí esto ocurre coercitiva o persuasivamente. Las ciudades conquistadas o colonizadas son ejemplos de cómo la identidad se ve afectada por este tipo de acontecimientos. Este tipo de conquistas son forzadas, en forma de guerra o conflictos bélicos, es decir coercitiva pero también es sugestiva, en el caso de las marcas corporativas que se apoderan de espacios. Lugares como Time Square son una especie de conquista agresiva de imposición de marcas, que sin duda hace brillar la ciudad de Nueva York. Por otro lado está el caso de la ciudad de Celebration en Florida, que no tiene anuncios en sus calles y comercios pero la ciudad entera es un triunfo de una marca, Disney.<sup>3</sup> La identidad de esta ciudad es dada por una corporación sugestivamente.

**Permanencia.** Se refiere al desarrollo de la identidad a través del tiempo. Es el devenir de una ciudad, su arraigo en el tiempo. Se refiere al tiempo en que ocurre la identidad de una ciudad. La identidad ciudadina no está determinada tanto por su historia sino por la suma de sus momentos. Es-

---

<sup>1</sup>Los atractores identitantes en una ciudad podrían seguir la función simbólica de un atractor de Lorenz en un sistema dinámico.

<sup>2</sup>Serían aquellas unidades mínimas que inducen a que ocurran cambios en las estructuras biológicas y por consiguiente desencadenan procesos formativos.

<sup>3</sup>En su libro *No Logo*, Naomi Klein, describe cómo las marcas empresariales actúan en la sociedad modificando estilos de vida (Klein, 2007). Celebration es una ciudad sin marcas aparentes pero que el estilo de vida es en sí la marca.

ta referencia al tiempo no es por su cronometría, sino por un *kairos*<sup>4</sup>. Bajo una perspectiva relativista considerar la identidad de una ciudad por su historia cronológica sería incompleta pues depende del nivel de frontera y observación que haga la ciudad, como colectivo, en el tiempo y espacio. La intensión de considerar la identidad de una ciudad por medio por su *kairos*, es decir, sus señales de apropiación, sería más totalizador. También se refiere al establecimiento de una identidad futura. Un ejemplo de esto son los monumentos, -se deriva de la palabra original, momentos- icónicos en las ciudades; como la Torre Eiffel, la Estatua de la Libertad, El Big Ben, etc., que son objetos que muestran un hito en la ciudad, un momento histórico. La identidad no es en sí la historia, sino la suma de esos momentos los que le da personalidad. Los monumentos son quizás, la representación de esos momentos.

**Reconocimiento.** Esto se refiere a saber que distingue y diferencia una ciudad de otra. Este reconocimiento de un sistema por sí mismo u otro se podría llamar conciencia de ser como se es y cómo se es frente a otro.

Para nosotros, el elemento que conforma la identidad de una ciudad, es considerado como la mente colectiva que tiene o adquiere conciencia de su personalidad distintiva. Para poder describir cómo es que ésta mente colectiva adquiere conciencia, se consideró el indagar acerca de cómo es que este proceso se da en una mente individual. ¿Cómo surge la conciencia individual y colectiva? Julian Jaynes, en su libro *El origen de la conciencia en la ruptura de la mente bicameral* (Jaynes, 2009), sugiere lo que sí es y lo que no es la conciencia. Ésta no sólo es el estar despierto, sino el estar consciente que se está consciente, implica la subjetividad de la subjetividad, y el ser observadores de segundo y tercer grado. En su postulado, Jaynes propone que esto se logra por la evolución en dinámicas del cerebro a raíz del lenguaje.

Otro debate que surge en cuestiones de conciencia, es si ésta ocurre en las dinámicas cerebrales y cómo ocurre este proceso. Este planteamiento es relevante para este estudio, ya que se puede comparar con lo que ocurre en la mente colectiva de una ciudad. El neurólogo Gerald Edelman investigó que en un área determinada del cerebro, localizada en el neurocortex, se efectúan procesos que hacen posibles la conciencia, capaz de identificar o diferenciar estados. Él sostiene que la conciencia es un proceso de interacción entre neuronas, que se coordinan espontánea y continuamente entre sí, con el cuerpo y con el ambiente. Es la conciencia un *qualia* o *cualidad subjetiva de la experiencia*. Edelman (Edelman y Tononi, 2000, p. 144). Propone una

---

<sup>4</sup>El *kairos* según el diccionario Diccionario general etimológico de la lengua española se refiere más por cada señal o marca que distinguen y separan eventos que ocurren.

teoría científica de la subjetividad, como base para entender los procesos de la conciencia humana. Él recalca que la conciencia no es una cosa, sino un proceso, y por tanto debería ser explicada en términos de procesos neuronales e interacciones, y no en términos de áreas cerebrales específicas o actividades locales. Más específicamente, postula que para entender la conciencia es necesario determinar aquellos procesos neuronales que son en sí integrados, aunque altamente diferenciados. La respuesta a su problema es lo que denominan “la hipótesis del Núcleo Dinámico.” Por otro lado, el físico Douglas Hofstadter (Hofstadter, 2008) define a la conciencia como la capacidad del cerebro de contemplarse a sí mismo. Es el “yo”, que describe como un sinfín de estados o patrones simbólicos. Pasando estos conceptos al reconocimiento de un colectivo ciudadano frente a otro, surge entonces la interrogante si esta conciencia de la que habla Jaynes se forma en un lugar, objeto o espacio urbano específico, es decir, si está localizada en partes específicas como pueden ser los objetos icónicos o se encuentra en las dinámica de la mente de la colectividad ciudadana, que está flotando como patrones simbólicos, es decir, deslocalizada. Bajo la mirada de las ciencias complejas nosotros propondríamos ambas posturas, la localizada y deslocalizada para determinar la conciencia de la identidad de una ciudad, pues depende del nivel observado. El pensamiento complejo contempla estas dos partes (objetos y dinámicas), más las dinámicas o formas de interactuar entre estos dos elementos, como un todo: un objeto más completo, al que hemos denominado, *objeto complejo* o *unidad compleja*.

Encontramos también otras dos variables para analizar qué subyace al proceso de identidad en las ciudades, además de los cuatro que ya hemos descrito. Por un lado el pensamiento de causación formativa, que dice que hay agentes causales que hacen posible la formación de estructuras, no sólo biológicas, sino sociales. La bióloga Jessica Bolker (Bolker, 2000) sugiere la existencia de campos formativos que determinan este proceso y no sólo son formativos en espacios, sino también en tiempo, de manera que tenemos la base para pensar que la identidad en las ciudades no sólo se refiere a su topología, sino a su devenir. El tipo de pensamiento sobre la emergencia por el contrario dice que no existe un agente o marcapasos que guíe la configuración en estructuras de metrópolis. Steven Johnson (Johnson, 2001) hace una descripción de cómo la forma emergente de una estructura social de hormigas sería equiparable a la estructura en comunidades sociales humanas. La cuestión para nosotros es considerar que la identidad en una ciudad no sería solamente la identificación y distinción de cada uno de sus componentes sino también de sus dinámicas e interacciones dentro y fuera del sistema.

Esto es que no sólo son la configuración de calles, avenidas, edificios, lo que interesa para que la ciudad se haga singular, sino el *modus operandi* en ella, su *praxis*. La hipótesis aquí sugerida es en primera instancia que se trata de un movimiento de formación en un entorno, donde la totalidad de estas interacciones es más que la suma de sus componentes y dinámicas internas. Es pues la identidad un proceso diferenciador. Esto abre un nuevo modelo, pues es común definir a la identidad como un atributo y no un proceso.

#### LA CIUDAD COMO *unidad compleja*; QUIÉN Y CÓMO SE CONFIGURA

Una vez que se han explicado la identidad y el objeto complejo (la ciudad) bajo estos enfoques (sistemas y complejidad), nos adentraremos en qué es lo que hace posible que las ciudades tengan personalidades tan singulares. ¿Cuáles son y cómo se originan estas dinámicas? A continuación se sintetiza una serie de movimientos o dinámicas encontradas en análisis de ciudades (Mercado, 2012):

##### *División*

Esta dinámica, que se observa en la Teoría Celular (Aranda-Anzaldo, 1997), consiste en la duplicación de la información estructural de las células una vez que está completa, para después separarse para formar otra estructura celular. En las ciudades hay dos maneras de completar su forma para después empezar su proceso de división o separación. Una es, cuando las ciudades no tienen espacio suficiente para crecer, la población junto con sus dinámicas tiende a salir y buscar otros espacios. El otro tipo de saturación de “información” que se presenta en una población, depende de la cantidad y calidad de ésta en cada miembro de la población. De tal manera que podemos observar estos fenómenos en ciudades centroeuropeas donde su índice de natalidad es muy bajo o los ciudadanos forman otras sociedades hasta “realizarse” u obtener toda su “información” completa. Una de las ciudades más afectadas con la fiebre borbónica en el siglo XIV, fue Venecia, en donde un tercio de la población murió a causa de esta enfermedad. Definitivamente en este caso la forma que adquirió la ciudad dependió de la calidad de información que poseía, no tanto por su cantidad ni su espacio territorial. De ahí emergieron objetos como las famosas máscaras que le han dado tanta identidad a esta ciudad medieval, que originalmente fueron diseñadas como interfaces antisépticas y después se transformaron en morfógenos de una *praxis citadina*, el carnaval.

*Inducción*

Esta interacción se observa igualmente a nivel biológico, en la organogénesis y el desarrollo embrionario<sup>5</sup>. Mediante un programa genético se establece previamente las condiciones iniciales de los morfógenos o los agentes causales de iniciarse la diferenciación y especialización estructural en un organismo. Ésta inducción se da a través de la unión física entre células para dar paso a señales moleculares como enzimas y proteínas. Esta posible manera de dar identidad a un organismo se podría trasladar a nivel de las ciudades y se le puede llamar también un fenómeno viral, pues los agentes encargados de dar identidad se transmiten a través de campos formativos<sup>6</sup>. Finalmente la transmisión de información es necesaria para que los cambios que dan forma ocurran. Se puede hablar entonces de una embriogénesis citadina donde los ciudadanos serían esos sensores y señales causales de transmitir la información que distingue y separa formas en un espacio determinado. Los objetos urbanos también son sensores y señales, pero dependen del procesamiento de la información por parte de quien los usa. Un ejemplo muy claro de esto son los llamados memes<sup>7</sup> Esa información guardada y acumulada en la mente colectiva hará que finalmente influya en las prácticas poblacionales dando formas y personalidades singulares a cada ciudad. Un hito urbano puede ser un morfógeno. Por ejemplo la ciudad de Nueva York modificó muchas prácticas por parte de sus ciudadanos después de los acontecimientos del 9/11.

*Concentración/Degradación*

Este fenómeno se observa en la transmisión de información genética. Se trata de transmitir los morfógenos informativos entre estructuras vecinas, hasta formar otras diferentes con menos información pero con orígenes en común. Ocurre a través de sensores y señales que transmiten y atrapan la información para desconcentrar la información identitante. Algunas ciudades centroeuropeas, por ejemplo observamos este fenómeno, donde la identidad estética más pura queda concentrada en las *cities*<sup>8</sup> y a medida que se dio el crecimiento en el tiempo y en el espacio, la misma estética

<sup>5</sup>Ídem

<sup>6</sup>Estos campos puede ser electromagnéticos o informáticos, en el caso de los medios masivos de comunicación.

<sup>7</sup>Término que se refiere a la unidad teórica de información cultural que se transmite de un individuo a otro, o de una mente a otra, o de una generación a la siguiente.

<sup>8</sup>Se le llama así, en algunas ciudades al centro histórico o antiguo, generalmente de mayor afluencia turística, como el centro de la ciudad de París o el barrio gótico de Barcelona.

se sigue observando en los suburbios o ciudades modernas pero parecería que está diluida. En el caso de la ciudad de París, se observa que la zona de la **Défence** tiene la misma estética visual que edificaciones situadas en la centro como Notre Dame pero modernizada. Por otra parte, parecería que cada chimenea actúa como sensor y señal receptora por otra chimenea vecina que se encargar de ir diluyendo esta información de materiales, colores y texturas en sus edificaciones.

#### *Desenvolvimiento/despliegue*

En las teorías del desarrollo biológico, a diferencia de la degradación, ésta dinámica para dar identidad consiste en desarrollar o expandir la información contenida. Ocurre también en la física mecánica con los principios de simetría y leyes de conservación o equilibrio. En física cuántica, al desplazarse las partículas aparentemente pierde su identidad, pues la identidad está contenida en una totalidad u holograma, pero que contiene la materia. Bohm (Bohm, 2008) dice que la información se despliega en formas y estructura explicadas, de las formas y estructuras no tangibles o implicadas. Para la causa final o la idea aristotélica del propósito de una forma, las ciudades albergarían a una serie de individuos con una misma identidad. La causa final puede ser lo que le da identidad. También existe la idea platónica en la cual existe una substancia, que contiene toda la información. La identidad de una ciudad podría estar contenida en una parte no localizada, y lo que hace representativas a estas identidades de las ciudades son sólo la materialización local. El sociólogo Bauman (Bauman y Vecchi, 2005), menciona que la identidad depende de los “ciudadanos del mundo”, es decir, de dónde pertenecen, permanecen y se relacionan de acuerdo a la sobre modernidad global y no depende tanto de lo local. Tan compleja es la identidad que solemos comer pizza de origen italiano en China de un cadena de restaurantes americana. Finalmente una influye en la otra.

#### *Resonar/sintonizar*

Considerando también algunas de las teorías organicistas, como la que sugiere la bióloga Jessica Bolker (Bolker, 2000), la dinámica para transmitir la identidad sería por medio de campos mórfogenéticos, que podrían ocurrir no sólo en los niveles biológicos, sino también en los niveles de estructuras individuales y colectivas, como en ciudades y en niveles del comportamiento o dinámicas en las estructuras que trasciende no sólo el espacio sino de igual modo, el tiempo (Narváez Tijerina, 2010).

*Continuidad/Discontinuidad*

Este movimiento formativo, consiste en encender o apagar información. El primer nivel de observación en que se puede describir este proceso es el genético (Aranda-Anzaldo, 1997). Pero también a nivel neuronal existen diversas teorías. Johnson, (2008) apunta a la emergencia de neuronas por módulos que se activan y se desactivan para explicar la emergencia de los comportamientos humanos. A nivel de procesos mentales o cognitivos en individuos, la escuela gestáltica describe estas dinámicas como parte de los mecanismos de conducta humana y de la realidad subjetiva o relativa. A nivel de observaciones sociales, Luhmann, en el libro *La realidad de los medios de masas* (Luhmann, 2008), habla de comunicación como pegamento que une y diferencia. Él menciona que esto se hace posible si hay información o no hay información. Es precisamente esta dualidad de “encendidos” de la *unitax* con la que define identidad.

*Controlar/organizar*

A nivel físico, uno de los fenómenos observados es el de equilibrio o simetría, el cual consiste en que los sistemas estén en constante equilibrio. Bajo estos principios universales, parecería que existieran agentes<sup>9</sup> que se encargaran de separar o unir la materia, energía e información. En las ciudades, esto implicaría pensar que este tipo de estructuras y formas urbanas tenga la capacidad de reconocimiento ya sea sí misma o por otra estructura o sistema superior. Es también una dinámica de interacción.

*Destilar*

Esto es discriminar estados. Basado principalmente en la Teoría del Núcleo Dinámico cerebral (Edelman y Tononi, 2000) donde existe una redundancia de las dinámicas neuronales en la que se discriminan estados mentales, los cuales dan cabida a la conciencia. Trasladando estos conceptos a los niveles de formación en las ciudades, se trata de la autorreferencia a sí misma lo que determinaría su identidad. Esta discriminación de estados se les ha llamado también *qualias*. Dado que las dinámicas ciudadinas son tantas y variadas serían solo los *qualias* o estados cualitativos discriminados

<sup>9</sup>Partimos inicialmente de la premisa de que el demonio de Maxwell, figura imaginaria ideada por el físico escocés James Clerk Maxwell, y propuesto para explicar la Segunda Ley de la Termodinámica, sería “capaz” de diferenciar entre moléculas de distintas temperatura, y separarlas.

los que determinarían la identidad. La figura 1 explica gráficamente estos movimientos.

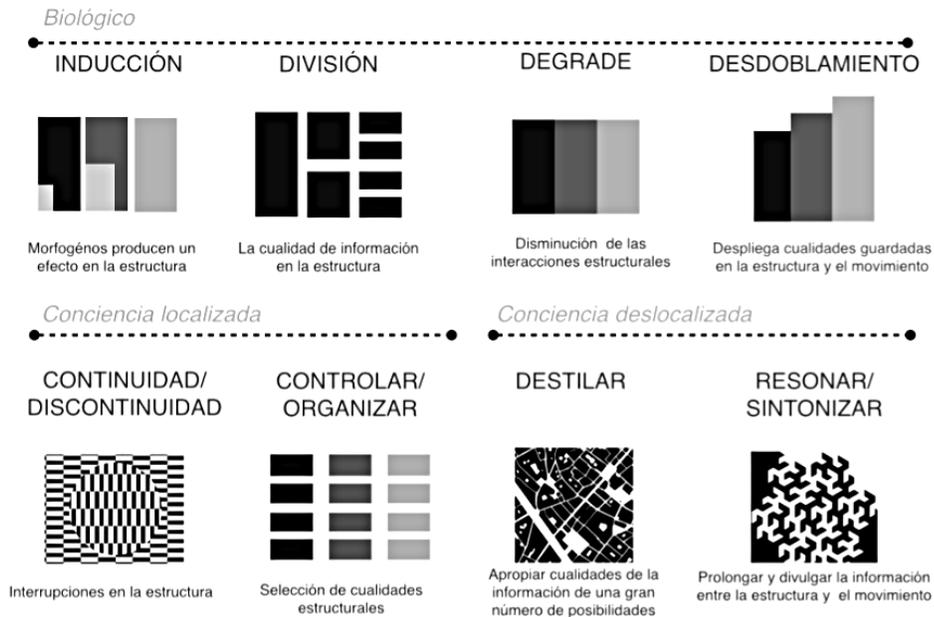


Figura 1: Movimientos de identidades urbanas.

## CONCLUSIONES

Las tres primeras interacciones observadas, inducción, división, y concentración – degradación tienen un programa determinado, ocurren mecánicamente y están localizadas en algunas de las partes de un sistema biológico pero analógicamente también puede ser un sistema ciudadano. En las dos siguientes interacciones, la capacidad cognitiva de controlar/organizar, encender/apagar se basa en la autoorganización de las dinámicas de partes. Los dos últimos movimientos descritos, sugiere la idea que las estructuras se forman de una manera organicista ya que ocurren en una deslocalización de sus dinámicas y como se observa, se tornan más complejas. Como se podrá observar en algunos casos, el proceso de la identidad en las ciudades se podría considerar holística por la manera de como emergen sus dinámicas, pero reduccionistas pues están localizadas en sus objetos. También se podría considerar deterministas por ciertos agentes causales coerci-

tivos, pero globales por estar deslocalizados. Como síntesis, al observar estos movimientos se reduce que el fenómeno de la identidad consiste en una dualidad formativa que hemos denominado como inclusión/exclusión. A continuación se despliega una lista de 40 maneras de describir este proceso de la identidad (Figura 2).

	INCLUIR	EXCLUIR		INCLUIR	EXCLUIR
1	Abrir	Cerrar	21	Desintegrar	Integrar
2	Absorber	Reflejar	22	Discrepar	Identificar
3	Análoga	Distinguir /Diferenciar	23	Disgregar	Formar
4	Analizar	Sintetizar	24	Dominar	Emancipar
5	A posteriori	A priori	25	Entropía	Negentropía
6	Borrar	Marcar	26	Globalizar	Localizar
7	Caos	Orden	27	Homogenizar	Heterogenizar
8	Colectividad	Individualizar	28	Imitar	Desarrollar
9	Completar	Incompletar	29	Indeterminar	Determinar
10	Continuar	Descontinuar	30	Inducir	Deducir
11	Conquistar	Libertad/independizar	31	Leer	Escribir
12	Copiar	Diseñar/Designar	32	Mezclar	Señalar
13	Desagrupar	Agrupar	33	Multiplicar	Dividir
14	Desenvolver	Envolver	34	Ocultar	Proyectar
15	Desfigurar	Conformar	35	Parecer	Contrastar
16	Desinformar	Informar	36	Pecar	Santificar
17	Desobediencia	Obediencia	37	Presentar	Ausentar
18	Desordenar	Ordenar	38	Sumar	Restar
19	Desorganizar	Clasificar	39	Totalidad	Parcialidad
20	Desproporcionar	Destinar /Disponer	40	Totalizar	Particularizar

**Figura 2:** Identidades urbanas.

Como parte de las conclusiones podemos decir que para poder explicar en su totalidad el proceso que subyace a la identidad de las ciudades bajo la perspectiva de la ciencia de la complejidad o pensamiento complejo, sería considerar, además del mismo sistema ciudadano, un sistema mayor o exógeno al mismo sistema. Un observador con intención de diseñar alguna ciudad como sistema o partes de esta, y/o sus dinámicas se basaría en dis-

criminación de estados cualitativos o *qualias*. Esto sería solo un paso en el modelo propuesto para el diseño de ciudades complejas adaptativas (Sosa, 2012). El diseñador tendría pues que analizar el Proceso en la Identidad de sistemas urbanos, con los elementos y factores aquí sugeridos, para poder diseñar sistemas que se identifiquen y distinguir de su entorno.

## REFERENCIAS

- Aranda-Anzaldo, Armando (1997). *La complejidad y la forma*. Fondo de Cultura Económica, México.
- Bauman, Zygmunt y Benedetto Vecchi (2005). *Identidad*. Losada, Madrid.
- Bohm, David (2008). *La totalidad y el orden implicado*. Kairós, Barcelona.
- Bolker, Jessica A (2000). "Modularity in Development and Why It Matters to Evo-Devo 1". En: *American Zoologist* 40.5, págs. 770-776.
- Edelman, Gerald M y Giulio Tononi (2000). *A universe of consciousness: How matter becomes imagination*. Basic books.
- Hofstadter, Douglas (2008). *Yo soy un extraño bucle*. Tusquets editores, Barcelona.
- Jaynes, Julian (2009). *El origen de la conciencia en la ruptura de la mente bicameral*. Fondo de Cultura Económica, México.
- Johnson, Steven (2001). *Sistemas emergentes. O qué tienen en común hormigas, neuronas, ciudades y software*. Fondo de Cultura Económica, México.
- Klein, Naomi (2007). *No logo, el triunfo de las marcas*. Paidós, Barcelona.
- Luhmann, Niklas (1996). *Introducción a la teoría de sistemas*. Universidad Iberoamericana, México.
- (2008). *La realidad de los medios de masas*. Universidad Iberoamericana, México.
- Mercado, Mercedes (2012). *La identidad de las ciudades a través de los objetos urbanos*. UANL, México.
- Morin, Edgar (1990). *Introducción al pensamiento complejo*. Gedisa, Barcelona.
- (2003). *El Método V. La humanidad de la humanidad, La identidad humana*. Cátedra, Madrid.
- Narváez Tijerina, Adolfo Benito (2010). *La morfogénesis de la ciudad. Elementos para una teoría de los imaginarios urbanos*. Plaza y Valdés, México.
- Sosa, Liliana (2012). *Diseño basado en sistemas complejos adaptativos*. UANL, México.

## LA PERIFERIA URBANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO: ENTRE LA COMPLEJIDAD DE LAS POLÍTICAS DE CONSERVACIÓN Y LA INERCIA DE LA EXPANSIÓN URBANA

*Jorge Escandón\**

### INTRODUCCIÓN

**S**IGUIENDO a David Harvey (Harvey, 2007), el capitalismo es un proceso de circulación de capital. Este proceso necesariamente se encuentra geográficamente organizado y, en su forma más avanzada, toma la apariencia geográfica de lo que ha sido llamado la urbanización planetaria. La urbanización del capital es simultáneamente la urbanización de la naturaleza. Así que, la circulación del capital, lo que llamamos “la economía” es también, un proceso de metabolismo social en el que circulan componentes físicos, químicos y biológicos (Heynen y col., 2006). Esto es, la transformación de materia en nuevas formas materiales. Cualquier forma de transformación económica también implica la transformación de la naturaleza y la materia basándose en decisiones políticas. Por supuesto que estos procesos políticos y ecológicos, a pesar de estar organizados en y a través de la urbanización, cada vez se manifiestan más a escala planetaria, y eso nos lleva a estudiar las distintas escalas geográficas a través de las cuáles la circulación de capital se organiza, mantiene y transforma.

Cuando se habla de sustentabilidad, el entorno urbano es a menudo descuidado u olvidado ya que la atención se centra en los problemas “globales” como el cambio climático, la deforestación, la desertificación, y problemas similares. Del mismo modo, gran parte de la literatura de los estudios urbanos es sintomáticamente silente en cuanto a los fundamentos físico-ambientales sobre los que descansa el proceso de urbanización (Heynen y col., 2006). Esto es un problema, pues ignora radicalmente el proceso de urbanización asociado a la circulación de la naturaleza. Sin embargo,

---

\*Programa de Investigación en Cambio Climático, UNAM

nuestra misma existencia está incrustada en procesos sociales y ecológicos que operan a una escala planetaria. Esto es, los procesos de cambio urbano se basan en un amplio rango de cambios sociales y ecológicos que muy a menudo tienen lugar lejos de la ciudad. Tomemos el ejemplo de los teléfonos celulares, que se han vuelto un elemento vital de la vida urbana cotidiana. Haciendo una descripción simplificada, su funcionamiento depende de las minas de coltán en África Central, su ensamblaje de los asalariados contratados en fábricas chinas, parte del desecho de estos se lleva a cabo en los arrabales de Delhi o Dhaka, y así sucesivamente. Si estamos interesados en el problema del cambio climático, vinculado a los patrones de consumo urbano y los temas asociados de cambio social y acción colectiva para modificación de dichos patrones de consumo, entonces es el proceso de urbanización el que tiene potencial de guiar dicho cambio, al mismo tiempo que es el escenario donde las transformaciones pueden ocurrir.

La franja peri-urbana (a veces también llamada la periferia urbana) como proceso de ocupación inercial es un gran reto de planificación espacial para esta época. En los países industriales o post-industriales más antiguos el área peri-urbana es una zona de cambio social y económico con una constante reestructuración espacial, mientras que en los países con economías emergentes y en la mayor parte del mundo en desarrollo, las áreas peri-urbanas son a menudo zonas de urbanización caótica con una continua expansión (Ravetz y col., 2013). En ambos casos, la periferia urbana puede verse no sólo como una franja en medio de la ciudad y el campo, como una zona de transición, sino que es un nuevo tipo de territorio multifuncional. Si bien se resiste a las definiciones simples, hay características comunes que encontramos en estas zonas, como una densidad poblacional relativamente baja para los estándares urbanos, asentamientos dispersos, alta dependencia del transporte para ir al trabajo, comunidades fragmentadas y falta de gobernanza espacial (Ravetz y col., 2013). Muchos desafíos globales en el presente siglo, surgen de las formas en que las ciudades crecen y cambian, incluyendo los patrones de consumo de recursos tales como agua y derivados del petróleo apuntando a problemas sociales y ambientales masivos que se pueden encontrar en las zonas de influencia de áreas peri-urbanas.

## CONTEXTO GLOBAL

La zona peri-urbana puede llegar a ser el tipo más común de vida y la situación de trabajo en las urbes durante el presente siglo. En algunas partes del mundo, se caracteriza por la riqueza y el consumo conspicuo.

En otras, donde la pobreza y desplazamiento social son más comunes, surgen una serie de problemas frente a los límites de la ciudad y el campo. Subyace aquí la esencia cambiante de la propia ciudad, no sólo como la expansión física de la forma urbana o suburbana, sino como dinámicas más amplias de transformaciones económicas, sociales, culturales y ambientales. Por lo tanto, tenemos que mirar más allá de la división convencional entre lo “urbano” y lo “rural”, visualizando un nuevo tipo de territorio-el espacio peri-urbano cuya característica central es que es una entidad que no está fija, sino que está en transición y flujo continuo. La periferia urbana es el espacio donde las transiciones de la estructura urbana en el paisaje rural, pueden abarcar un territorio significativo en términos de área, por lo que debe contemplarse el contexto de un proceso más dinámico y complejo, entre los núcleos urbanos densamente poblados y las zonas rurales aledañas. Las áreas periurbanas como elementos clave de la sustentabilidad de las ciudades, son una prueba de fuego de cambio y transición, no sólo a nivel local en la interfase de zonas urbanas y rurales, sino en la forma de la totalidad de la ciudad-región, o de la denominada megalópolis (Ravetz y col., 2013).

#### DEFINICIÓN CONCEPTUAL Y DIVERSIDAD DE PERSPECTIVAS DE LA PERIFERIA URBANA

De difícil definición conceptual y delimitación, la periferia urbana cuenta con la desventaja de que, en cuanto a objeto de investigación, es un territorio resbaladizo, en continua situación transicional, en proceso de permanente transformación (o con expectativas de ser transformado) y muy susceptible de nuevas intervenciones. Es fácil confundirse en la investigación sobre el límite urbano-rural inspirado en la idea de un continuo urbano-rural. Bryant (Bryant y col., 1982) ilustra esta confusión por un modelo en el que los rangos de regionalización, desde la ciudad núcleo así como a través de las franjas interior y exterior, es una zona de sombreado diluido de lo urbano hacia el interior rural. Sin embargo, mientras que este modelo funciona en lo general, el complejo patrón de ciudades y su entorno reales, con todas sus diferentes estructuras espaciales que surgieron tanto de un enfoque geográfico e histórico, así como mediante la intervención de precursores políticos, a menudo es difícil de encajar por completo como un todo. Este es el caso, independientemente del hecho de que la idea incluye varias dimensiones en serie (o varios grados continuos) de urbanización en el espacio urbano-rural, que pueden resultar en patrones espaciales complejos

(Robinson, 1990). Más recientemente, el término interfaz urbano-rural apareció en la investigación, haciendo hincapié en el carácter mixto de estas áreas sin fijarlos a un gradiente único y simple (Ravetz y col., 2013), relacionándolos con la reubicación de los servicios vinculados con la industria en las áreas rurales, el desarrollo de la agricultura a tiempo parcial, las segundas residencias y la migración de jubilación, como algunos de los elementos que desempeñan un papel importante en este proceso.

La periurbanización también incluye otras transformaciones, que no sólo dependen de la migración y el establecimiento permanente de personas. Estas vinculan movimientos de desplazamiento o de recreo, así como otros cambios en el comportamiento de los residentes rurales antiguos y nuevos, causados por una mayor integración de la zona rural en el sistema de una región urbana (Ravetz y col., 2013). Además, los vínculos relacionados con las interacciones humano-ambientales son determinantes para las relaciones de uso de suelo periurbanas. El impacto y la importancia de estos procesos, así como la forma de convertirlos hacia el desarrollo sostenible, es uno de los retos del presente siglo.

Desde una perspectiva geográfica, el estudio del área que conforma la periferia urbana de las grandes ciudades, implica tratar con un espacio que expresa una situación de interfaz entre dos formas territoriales aparentemente bien diferenciadas: el campo y la ciudad. Ha recibido diversas denominaciones entre las cuales podemos nombrar: la periferia urbana, el "rur-urbano", la "ciudad difusa", la "frontera campo-ciudad", la "ciudad dispersa", "territorios de borde", "borde urbano/periurbano", el contorno de la ciudad, "extrarradio", "exurbia", etc. (Barsky, 2005).

Desde una perspectiva histórica, considerando ciertos antecedentes sobre el tema relacionados con la historia de la disciplina geográfica y la planeación urbana, podría mencionarse el aporte del biólogo escocés Patrick Geddes y su obra clásica *Cities in evolution* de 1915, donde el autor llama la atención sobre las conurbaciones que, desde fines del siglo XIX, estaban generando la dispersión de los centros urbanos ingleses en los campos agrícolas más próximos, estableciendo la necesidad de implementar el town/country planning (Rueda Palenzuela, 1995, pp 32). Asimismo, en los años 20 y 30 del siglo pasado, la escuela de ecología humana de la Universidad de Chicago se preocupó por los procesos de expansión territorial de las ciudades en los Estados Unidos, analizando sus consecuencias desde un punto de vista ecológico. Se establecieron modelos de planeación relacionados con coronas concéntricas, espacios radiales o de núcleos múltiples para explicar la lógica de la evolución espacial de los centros urbanos. Se uti-

lizaron términos como sucesión, invasión, asimilación, provenientes de la biología (Burgess, 1926), para explicar cómo las ciudades iban avanzando sobre sus periferias.

En 1937 el geógrafo T.L. Smith utilizó el concepto de franja urbana para describir al área localizada fuera de los límites administrativos de los municipios de la ciudad de Luisiana (Smith, 1937). Durante la primera mitad del siglo XX, el proceso de periurbanización se consolidó debido a una descentralización de las actividades productivas de la ciudad, la construcción de autopistas y el acceso al crédito hipotecario por parte de diversas clases sociales, lo cual generó que estas áreas crecieran y se poblaran a gran velocidad, dando pauta al surgimiento de la denominada ciudad difusa durante las décadas de 1950 y 1960, de allí en adelante, los procesos que siguieron a este último período se caracterizaron por la dotación de diversos servicios urbanos y tecnologías fuera de la ciudad, una revalorización social del medio natural por parte de sectores económicamente acomodados y otros fenómenos que intensificaron las transformaciones del área periurbana (Barsky, 2005). En 1955 Auguste Sectorsky creó el término exurbia, diferenciándolo del de suburbia, para describir las costumbres de las clases acomodadas que migraban hacia las afueras de la ciudad de Nueva York, inspirándose en el ideal del lifestyle americano de grandes casas rodeadas de paisajes campiranos (Sectorsky y Osborn, 1955). A partir de entonces, exurbia pasó a ser un término de uso común en el idioma inglés. En 1958, Kurtz y Eicher escribieron un trabajo titulado *Fringe and suburb: a confusion of concepts* tratando de diferenciar los alcances de los conceptos (Kurtz y Eicher, 1958). Pero es desde la década de los sesentas del siglo XX, cuando se producen una gran cantidad de trabajos académicos -especialmente en Inglaterra y Francia- sobre el fenómeno de la urbanización del campo.

#### PENSAMIENTO SISTÉMICO Y COMPLEJIDAD

La teoría de la complejidad, es muy sugerente como marco conceptual para incidir en la manera en la que se ha venido desempeñando la planeación de las ciudades, en relación a la periferia urbana. Para el presente escrito, se hará una descripción básica de algunos conceptos de las ciencias de la complejidad que tendrían que contemplarse dentro de los debates actuales sobre la teoría de la planeación de la urbanización y el desarrollo sustentable. La complejidad aquí representa un número creciente de actores y factores entre los que, entre otros, la causalidad, la estabilidad contextual y un entendimiento común a priori al problema de planificación está dis-

minuyendo. Por el contrario, la incertidumbre como elemento a incorporar por su potencial de modificación de los resultados del proceso de planificación es cada vez más aceptada (Roo y Rauws, 2012).

El pensamiento sistémico se centra en observaciones generales sobre las estructuras de los problemas o situaciones subyacentes. La teoría de sistemas clásica distingue tres categorías de sistemas (Kauffman, 1991). En un sistema de categoría I (sistema cerrado), el contexto es estable y hay relaciones causa-efecto directas entre los diferentes elementos o entidades. En la categoría II de sistemas (sistemas de retroalimentación), la relación de causa efecto entre los elementos es menos directa, debido a las fluctuaciones internas y externas. En consecuencia, hay una necesidad de incluir controles durante el proceso con el fin de evaluar si todas las condiciones y los puntos de partida siguen siendo pertinentes o deben modificarse. En la teoría de sistemas esto se conoce como “mecanismos de retroalimentación”. Los sistemas de categoría III (sistemas de red abierta) tienen las relaciones causa-efecto más “débiles”. En este caso hablamos de “causalidad a distancia”. Otra característica de los sistemas de red abierta es que son fuertemente dependientes del contexto (Roo y Rauws, 2012). Tienen una cierta dinámica y flexibilidad como resultado de las influencias externas. Estos sistemas de red abiertos representan una realidad que no tiene factores estables, e incluye a muchos actores con diferentes intereses, lo que significa que es difícil predecir el resultado de las intervenciones. Es esencial en este tipo de sistema el consenso alcanzado entre los actores (Roo y Rauws, 2012). Estas tres categorías de sistemas forman un espectro que puede ser usado en la planificación espacial de la urbanización en la periferia.

A diferencia de las categorías de sistemas tradicionales mencionadas en el párrafo anterior, se supone que los sistemas de categoría IV evolucionan continuamente *en el tiempo* de una manera discontinua. Estos sistemas de cuarta categoría, con sus características relacionadas con el tiempo, nos dicen que el espectro que se discutió anteriormente con sus tres categorías de sistemas tradicionales, incluyen la variable tiempo. Lo singular de esta evolución es que es no lineal. En otras palabras, los sistemas complejos están sujetos a cambios constantes y discontinuos. Los sistemas espaciales complejos son sistemas abiertos a menudo autónomos, que son sensibles a los cambios de contexto (Portugali, 2006). Desde esta perspectiva, una ciudad en general y la periferia urbana en particular, puede ser vista como un sistema complejo, ya que las ciudades cambian con el tiempo como resultado de toda clase de factores contextuales, desarrollos internos y crecimiento (Roo y Rauws, 2012).

La habilidad de adaptarse a influencias externas es referida en un sistema complejo como su “capacidad adaptativa”. La capacidad de desarrollarse internamente se conoce como “autoorganización”. El nivel de autoorganización está determinado en parte por la diversidad de una ciudad, así como las oportunidades que esta crea para el cambio, expresándose en términos tales como “pluripotencia”, “ventanas de oportunidad” y “espacios de posibilidad”. Las posibilidades de la conducta adaptativa, la autoorganización y la diversidad de desarrollos potenciales no surgen por casualidad. Estas son principalmente el resultado de un encuentro relacionado con la evolución en el pasado. A esto le llamamos “dependencia de la trayectoria”, lo que resulta en procesos “evolucionistas”. Todos estos aspectos caracterizan a los sistemas complejos (Roo y Rauws, 2012).

Los sistemas complejos son adaptativos en términos de acontecimientos externos, pero también son capaces de mantener su medio interno mediante procesos de equilibrio dinámico. Son, por lo tanto, robustos y flexibles. En resumen, el desarrollo de un sistema complejo es cambiante en el tiempo, resultado tanto de las influencias del contexto, así como de la interacción continua entre sus elementos (McGlade y col., 2006; Zuiderhoudt y col., 2002). La teoría de la complejidad no sólo nos permite formular una perspectiva alternativa, sino también nos proporciona una mejor comprensión de los sistemas espaciales complejos y las posibles oportunidades para influir en el impacto de esta dinámica del sistema. Los conceptos de “autoorganización” y de “dependencia de la trayectoria y sus condiciones iniciales” tomados de la teoría de complejidad pueden ayudarnos a mejorar nuestra comprensión de la evolución espacial y la forma en que se desarrollan (Roo y Rauws, 2012). En el caso de la autoorganización, por ejemplo, podrían surgir nuevas estructuras institucionales a través de la organización espontánea de los actores, ya que un solo actor no es capaz de controlar el proceso (Heylighen, 2008).

Los sistemas espaciales complejos son sensibles a los procesos de autoorganización y están parcialmente estructurados por la dependencia de la trayectoria. Estos sistemas ya no son considerados como algo estático, sino que se espera que estén abiertos al cambio, por ejemplo respondiendo a la influencia contextual (Roo y Rauws, 2012).

El concepto de transición es bien entendido dentro de la física y los entornos matemáticos. En la física, las transiciones de fase se definen como transformaciones de la materia de un estado a otro, como las transformaciones del agua desde el estado líquido al gas o al hielo. Las bifurcaciones se consideran sucesos que ocurren en los sistemas dinámicos, provocados por

pequeños cambios en determinadas partes del sistema (representadas por los parámetros de bifurcación) y causantes de un cambio repentino ya sea cualitativo o topológico en el comportamiento del sistema (Roo y Rauws, 2012).

En un entorno social este tipo de transiciones, también se están llevando a cabo. Estos son, sin embargo, el resultado de múltiples cambios, dependientes de las interacciones tanto dentro de los sistemas como en el contexto del sistema que de una manera difusa se suman a una masa crítica, lo que representa un cambio estructural que co-evoluciona de una fase estable a otra.

Las relaciones cambiantes entre lo urbano y lo rural también pueden verse como una sucesión de diferentes transiciones. Hace menos de un siglo, el área urbana y el campo eran en gran medida sistemas separados. Principalmente durante el siglo XX, las zonas urbanas y rurales se volvieron cada vez más integradas en el modelo de ciudad industrial, permitiendo que surgieran zonas periurbanas como interfaces transicionales entre ellas. Lo urbano y lo rural se integran ahora, hasta el punto en que ambos han pasado a formar parte de un nuevo sistema a escala más grande de la región urbana (Roo y Silva, 2010), cuya zona de transición es la periferia urbana.

Las transiciones son los cambios en todo el sistema, que pueden involucrar a los sistemas económicos, las estructuras sociales, los sistemas políticos, los patrones espaciales, la tecnología y los sistemas de infraestructura (Geels, 2005), así como fenómenos ecológicos. A menudo hay transiciones paralelas en roles socioculturales, identidades, percepciones, y cuál es la razón de ser de la ciudad - que es una pregunta común en muchas ciudades que ya no conservan su función original haya sido esta industrial, económica o política. No sólo existen transiciones físicas y funcionales, sino aquellas de índole integral y de identidad, cuando las áreas evolucionan a partir de un papel de apoyo como ciudad dormitorio, a un sistema urbano de baja densidad en pleno funcionamiento - una "post-metrópolis" (Soja, 2000), o un "metro-paisaje" (Krafczyk, 2004; Giannini, 1994). Algunas transiciones típicas en los bordes de las ciudades son (Ravetz y col., 2013):

- Transición rural: alejamiento de la producción primordialmente agrícola hacia un paisaje más diverso y multifuncional junto con su patrón de asentamientos humanos;
- Transición Periurbana: como lugar de ubicación predilectos de la re-estructuración de los sistemas globalizados de producción y consu-

mo;

- Transición urbana: la reestructuración hacia una economía en red con diferentes patrones de infraestructura verde / gris.

Cada una de estas transiciones pueden ser de efectos micro, meso o macro-nivel, que van desde los lugares individuales, a los sistemas urbanos integrales (Roo y Silva, 2010). Cada transición genera entonces algún tipo de respuesta por parte del sistema afectado. En algunos casos hay reacción negativa y resistencia, mientras que en otros hay respuestas positivas, para construir resiliencia a las crisis, o la innovación creativa de nuevas funciones dentro de un nuevo entorno. Tales respuestas pueden llegar a ser entonces incorporadas como objetivos de las políticas de la periferia urbana.

#### ENFOQUES DE LA PERIFERIA URBANA

En los estudios de la periferia urbana, predominan dos enfoques: aquel que la observa como una zona de dispersión urbana y aquel que lo visualiza como un espacio ecológico con fragmentación de hábitats. Bajo estos enfoques, es importante considerar los procesos sociales y culturales vinculados a la producción de paisajes en la periferia urbana. En opinión de (Taylor, 2011), en la actualidad el concepto de *exurbia* tiene el potencial para mejorar nuestra comprensión de una parte importante de los asentamientos urbanos globales en relación a estos aspectos sociales y culturales.

Otros autores como Theobald (Theobald, 2001; Theobald, 2004; Theobald, 2005), que estudian la dinámica de las áreas circundantes cercanas a las ciudades en Estados Unidos de América, se basan en datos demográficos para determinar la velocidad y la densidad de crecimiento de la población. Theobald sugiere que las periferias urbanas están creciendo más rápido que las ciudades o suburbios tradicionales, afectando a un territorio cada vez mayor.

Los conservacionistas definen la periferia urbana a través de sistemas naturales existentes, más el grado de modificación propiciado por los humanos. Para las periferias urbanas se siguen utilizando datos demográficos, los cuales se integran con datos seleccionados con criterios biológicos o ecológicos en sistemas de información geográfica (para estudiar cambios en la cubierta terrestre), los cuales permiten a los conservacionistas identificar áreas de cambio (Egan y Luloff, 2000; Hansen y col., 2005), donde la conservación del hábitat se puede promover siempre y cuando el hábitat natural

se encuentre relativamente sin perturbaciones (Lepczyk y col., 2007) que influyan en transiciones de fase o sin intervención humana.

Audirac, en su revisión de 1999 de los estudios de los márgenes urbanos (Audirac, 1999), describe que la investigación de la periferia urbana y su relación con asentamientos humanos, cae en las siguientes tres categorías: estudios de *estructura*, estudios sobre *procesos* y estudios sobre *comportamientos*. La *estructura*, en el estudio de asentamientos en los márgenes urbanos, se refiere a la forma, ya sea compacta, difusa, radial, etc., visualizada con la ayuda de fotografías o imágenes aéreas<sup>1</sup>. Los *procesos* que producen esas formas, pueden incluir las fuerzas económicas, las tendencias sociales, o factores políticos u otras influencias culturales. Y el comportamiento incorpora aspectos relacionados con las distintas motivaciones que tienen los diferentes actores que residen o actúan en el área periurbana (Taylor, 2011) (véase también (Lindstrom y Bartling, 2003)). Los investigadores sociales han tratado de dar sentido a las conclusiones de los analistas espaciales mediante el estudio de las formas de vida y los comportamientos de los bordes urbanos a través de la ciencia social.

Al darle sentido a la tendencia de atracción hacia las periferias urbanas, Champion (Champion, 1998) y Hart (Hart, 1995) enlistan a la “naturaleza” así como a la “privacidad del paisaje”, como motivaciones importantes por parte de los residentes. (Berg y col., 2007, pp. 91) concluyen en su estudio, que la apreciación de los “urbanitas” y su demanda de naturaleza refleja una necesidad básica que no debe ser descartada como un mero “romanticismo rural”. En la lucha por estas visiones, la ciencia ecológica es movilizadora políticamente para asegurar ciertas áreas de conservación de la naturaleza, hasta el extremo en algunos casos de limitar el acceso visual y físico a las áreas conservadas (Taylor, 2007).

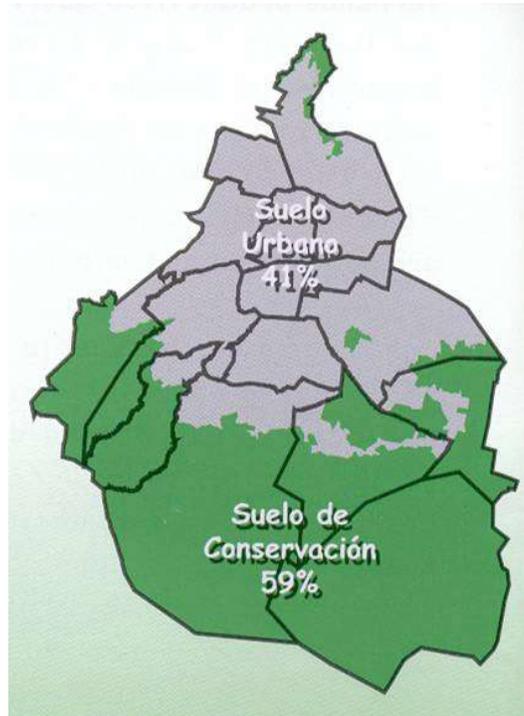
Desde la ecología política (Robbins, 2005), el foco de análisis se centra en los impactos de las interacciones humanas con la naturaleza, poniendo atención en los flujos simultáneos de poder a través de diferentes escalas, como hacen los estudiosos del paisaje cultural (Harvey, 1990; Henderson, 2003; Heynen y col., 2006; Lindstrom y Bartling, 2003). Esto implica que el desarrollo periurbano se negocia a escala de la política local (Bjelland y col., 2006), enfrentando a una variedad de personas con diferentes puntos de vista acerca de la naturaleza, que están en tensión y son impugnados en el paisaje local.

Debido a que la idea de la naturaleza se utiliza para explicar diferentes

---

<sup>1</sup>Muchos de los estudios sobre sistemas complejos se han centrado en estructuras urbanas, su dimensión fractal, su constante de transición de fase (Ball, 2008)

fenómenos relacionados con la periferia urbana desde diversos enfoques, es importante considerar que la producción del paisaje en los entornos periurbanos, implica construcciones de la naturaleza relacionadas con los distintos actores que interactúan en este territorio.



**Figura 1:** Representación gráfica del Suelo de Conservación de la Ciudad de México. Fuente: Programa General de Ordenamiento Ecológico de la Ciudad de México (2000).

#### CONSERVACIÓN EN LA PERIFERIA URBANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

El Distrito Federal, conocido ahora como la Ciudad de México, abarca un área aproximada de 148.000 km<sup>2</sup> con una población de más de 8,5 millones, lo que hace que sea la ciudad más densamente poblada de México. La Ciudad de México está dividida en dos grandes zonas: urbana y de conservación. La primera corresponde a la zona construida (la ciudad), mientras que la segunda es una categoría administrativa diseñada para proteger los recursos naturales (Campuzano y col., 2011). El Suelo de Conservación (SC)

de la Ciudad de México es un área designada por la ley en el ordenamiento territorial; de acuerdo con el Programa General de Ordenamiento Ecológico del Territorio (GDF, 2000), el SC representa el 58 % de la superficie total de la Ciudad de México (85.000 ha) (ver figura 1). Es importante tener en cuenta que la propiedad de la tierra en este territorio es principalmente colectiva (de comunidades y ejidos). Geomorfológicamente, la Ciudad de México es muy diversa y se compone de un valle, zonas de transición y zonas de montaña. En el SC, los bosques y la agricultura son los usos primarios del suelo, siendo estos usos los mayores contribuyentes a los servicios del ecosistema como resultado de las características del suelo y el bosque (Aguilar y Santos, 2011a; Aguilar y Santos, 2011b; Saavedra y col., 2011). El SC funge como área de infiltración y es la fuente del 70 % de toda el agua que se consume en la Ciudad de México (Perevchtchikova y Vázquez, 2012); 90 toneladas/ha/año de dióxido de carbono es capturado por su bosque; para esta región, se han registrado aproximadamente 2,213 especies de plantas vasculares (Fernández N. y Arreguín, 2007), de acuerdo con (Velázquez y Romero, 1999), el SC cuenta con alrededor de 3,000 especies tanto de flora como de fauna; el grupo de las aves es el mejor representado, con casi el 30 por ciento de la diversidad nacional. Los mamíferos locales representan poco más del 10 por ciento de la riqueza nacional (CONANP, 2006), algunas con distribución muy restringida como el conejo zacatuche (*Romerolagus diazi*), especie endémica de la región (Velázquez y Romero, 1999). Es también un área de servicios recreativos y paisajísticos (Castelan y Mejía, 2011). En este sentido, el SC cobra importancia para la ciudad como paisaje territorial proveedor de servicios ambientales, siendo un argumento atractivo para la construcción de las políticas ambientales para frenar el proceso de urbanización (Escandón, 2014). De acuerdo con el PGOETDF, la caza, la tala, la cosecha de hierba, la introducción de especies exóticas, las prácticas agrícolas que emplean pesticidas, las modificaciones de los ríos, la eliminación de residuos urbanos y alteraciones del uso de la tierra para el uso urbano están prohibidos en el SC. Sin embargo, en las últimas décadas, el SC ha enfrentado intensos cambios de uso del suelo (urbanización) (Campuzano y col., 2011; Perevchtchikova y Vázquez, 2012) que son principalmente el resultado de los asentamientos irregulares.

La planificación de la expansión urbana a escala delegacional, implica una discusión de visiones alternativas para un determinado paisaje que hacen recurrir a material histórico, a los conceptos simbólicos y vivenciales sobre el paisaje y también a bases de datos de condiciones bióticas y abióticas. Podríamos asumir que durante este proceso se está analizando la

“dependencia de la trayectoria a condiciones iniciales”.

Al hablar de paisaje la gente está mostrando sus valores y creencias acerca de sí mismos, del territorio así como de su sociedad (Taylor, 2007). En el SC, la valoración del paisaje como patrimonio natural entendido como los últimos reductos de zonas boscosas dignas de ser conservadas dentro de los límites territoriales de la ciudad, ha sido determinada como lo políticamente acertado. Esto ha sido a costa de la idea de un paisaje rural apreciado por sus tierras cultivadas y con comunidades que habitan de manera armónica y unida a la tierra, idea que ha sido representada de manera menos persistente para representantes administrativos de entidades gubernamentales y como la forma menos políticamente acertada (Escandón, 2014). Se puede decir entonces que, la visión de un área de vida silvestre según la definición de las ciencias ambientales y un paisaje degradado por la habitación humana, aún digno de restauración se ha realizado correctamente con mucha influencia por parte de instituciones académicas. Sin embargo, pese a que la urbanización es resistida a través del proceso de planeación, la expansión hacia el SC de manera irregular ha persistido y cambia constantemente dicha planificación por la influencia de otros actores cuyos intereses económicos e inmobiliarios, así como intereses políticos, impugnan la visión conservacionista. Cuando finalmente se toma la decisión para expandir el área urbana en el área rural, el campo se ve empujado y la periferia urbana transformada.

Siguiendo los planteamientos de Taylor (Taylor, 2007) el SC visualizado como la periferia urbana, describe el borde de la ciudad como zona de “transición perpetua”, un “campo de batalla” entre distintos valores en conflicto. En este sentido, la literatura sobre la periferia urbana es útil debido al reconocimiento de que el paisaje y los valores conjuntados allí, se desestabilizan por la influencia cada vez mayor de la ciudad. ¿Cómo se confronta la representación del paisaje? Lo primero que se puede decir es que las representaciones del paisaje se vuelven simbólicas, lo que significa que se abstraen, se imaginan o se idealizan, siendo un “corte suelto” de su espacio material. Lo segundo es que los paisajes así representados son más que abstracciones de sí mismos, y a menudo son un símbolo de grandes posiciones ideológicas, a veces como forma abreviada de lo que se da por sentado de las visiones del mundo (Taylor, 2007).

## SC, PERIFERIA URBANA Y SISTEMAS COMPLEJOS

Complejizar el tan mentado desarrollo sustentable en la periferia urbana, implica explorar la “tensión de la sustentabilidad” entre la competencia de agendas y políticas de desarrollo urbano, de desarrollo rural y de conservación (Ravetz, 2001; CURE, 2003). En esta tensión es relevante mencionar que el sistema urbano globalizado exige tierras para proveerse de servicios ambientales, equipos de materiales, gestión de residuos, actividades recreativas, así como comodidades y mercancías ubicadas en la periferia urbana relacionada con el SC.

El SC al tener muchas de las características de las zonas peri-urbanas es un tema difícil y de actualidad en muchos aspectos, lo cual sin duda, es un reto para la investigación científica. Hay muchos procesos físicos y humanos, tanto en las interacciones para analizar y modelar, como en la realidad del SC que son impulsados por la interdependencia, la incertidumbre y la complejidad. Las herramientas de modelado y análisis para describir plenamente este tipo de áreas no existen (Ravetz y col., 2013), por lo que hay que buscar otras formas de generación de evidencia y datos útiles.

Pese a que el SC este delineado en los documentos de planeación urbana, a nivel local no está claramente delineado, ya que es un *híbrido* resultante de las diferentes fuerzas que inciden en él y que provienen desde diferentes escalas. Es complejo desde su definición, ya que a menudo se describe como un amplio espectro de usos de suelo que van desde las zonas rurales hacia zonas urbanas cambiantes, siendo el resultado directo de una dependencia de trayectoria de expansión urbana. Además de la perspectiva clásica de la dinámica de cambio tales como el proceso de aglomeración regional, los efectos estructurales de la globalización y la acumulación de capital, hay otros niveles de análisis tales como los efectos de las transiciones de fase, así como la retroalimentación de la inteligencia colectiva de la política y la gobernabilidad, característicos de los sistemas de red abierta.

Visualizar al SC desde una perspectiva de sistemas complejos, nos obliga a “traducir” ciertos términos y acoplarlos a la perspectiva de planificación territorial de la periferia urbana. A manera de ejercicio se sugiere que la “capacidad adaptativa” del SC como el territorio que absorbe la periferia urbana, implica balancear las influencias urbanas vinculadas con la expansión. La complejidad y la teoría de la transición se basa en el pensamiento ecológico actual sobre “sistemas adaptativos complejos”. Estos muestran comportamientos autoorganizados ‘no lineales’ y evolutivos en sistemas de múltiples relaciones con múltiples escalas (Waltner-Toews y col., 2008). La

implicación de la política es crucial, es decir, la gestión de un sistema adaptativo complejo es una tarea muy diferente a la gestión de un sistema lineal, donde los resultados son el resultado directo de las entradas. En general, un sistema “humano” adaptativo complejo (en contraste con el biológico) tendrá como objetivo desarrollar la capacidad de conocimiento colectivo y el aprendizaje social, centrándose en la “inteligencia compartida”, que permite el pensamiento estratégico y la innovación creativa (Ravetz, 2011). La “autoorganización” de la periferia urbana en el SC como sistema, implica en primera instancia, el fortalecimiento de instituciones comunitarias pertenecientes a los propietarios de la tierra tales como las asambleas, también abrir espacios de discusión más democráticos con diversas autoridades, mayor coordinación de diversas instituciones gubernamentales que operan en el territorio del SC y transparencia de intereses entre aquellos que tienen aspiraciones a expandir tanto desarrollos inmobiliarios como carreras políticas que dividen instancias comunitarias.

Hablar de sustentabilidad para la periferia urbana ubicada en el SC, implica analizar la tensión entre la dependencia de trayectoria de la expansión urbana y las transiciones de fase potenciales del SC. La “transición de fase” en la periferia ubicada en el SC implica tomar en cuenta las bifurcaciones entre la lógica de expansión urbana, la lógica de producción rural y la lógica de conservación, para la viabilidad a futuro de la Ciudad de México y la megalópolis. El resultado no siempre es suave y predecible, sino que puede ser una transición rápida, una “discontinuidad”, o en algunos casos un fallo catastrófico.

Una visualización alternativa de las transiciones de fase en el SC puede ser la perspectiva constructorista de la naturaleza, donde el SC no es una realidad objetiva, aunque tienda a parecer así, sino una entidad recreada en la interacción social. El paisaje en el SC, donde la ciudad y el campo colindan es un área de bifurcación altamente disputada. Si asumimos al SC como una entidad construida socialmente, la implicación inmediata es que este espacio está sujeto a distintas comprensiones, es decir, significa cosas diferentes para cada uno de los actores involucrados y que, debido a que las varias construcciones del SC se relacionan y se enfrentan unas con otras, hay ciertas representaciones que pesan más que otras en la formulación de la política ambiental (Escandón, 2014).

La perspectiva original de la planeación urbana, que apuesta a que las ciudades pueden ser comprendidas y modeladas como sistemas generales de “arriba hacia abajo”, donde la atención se centra en la simulación del sistema en equilibrio, debe modificarse radicalmente hacia la visualización

de este tipo de sistemas como continuamente fuera del equilibrio con una dinámica impulsada desde “abajo hacia arriba” (Batty y Marshall, 2009). La planeación urbana del SC y su periferia urbana, tiene que articular la colaboración entre los muchos participantes que conforman un problema y su solución o resolución específica. En este sentido, la planificación debe ser considerada como un “diálogo” donde los planificadores son negociadores que de alguna manera buscan diseñar un consenso que es, en esencia, el plan. La construcción tanto del problema a resolver como de sus soluciones, debe partir de buscar consenso como un medio para resolver los conflictos y esto se ve en términos del grado en que el conflicto se resuelva. Tal proceso es, por supuesto intrínsecamente político.

Otra dinámica de visualización del SC en la perspectiva de sistemas complejos, sería desde el metabolismo urbano (Swyngedouw, 2006). El Análisis Integrado Multi-Escalar de Metabolismo Social y de Ecosistemas (MuSIASEM), es un enfoque innovador para la contabilidad que integra la información cuantitativa generada por distintos tipos de modelos convencionales, basados en diferentes dimensiones y escalas de análisis (Giampietro y col., 2009). Retoma varios conceptos innovadores derivados de la Bioeconomía y de la Teoría De Sistemas Complejos, tales como el *modelo de flujo de fondos*, *las gramáticas de usos múltiples* y *el análisis de ciclos impredicativos*. La aplicación de estos conceptos permitiría el uso simultáneo de técnicas económicas, sociales, demográficas junto con variables ecológicas, en el análisis del patrón metabólico del SC, incluso si estas variables son definidas dentro de diferentes dimensiones de análisis y en dominios descriptivos no equivalentes en referencia a diferentes escalas y niveles jerárquicos. Teniendo en cuenta esta característica especial, MuSIASEM nos permite analizar con eficacia el nexo entre la energía, los alimentos y el agua, teniendo en cuenta factores heterogéneos, tales como la dinámica de población, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y los cambios de uso del suelo (Giampietro y col., 2009).

El modelo de flujos de fondo propuesto por Nicholas Georgescu-Roegen está en la base de MuSIASEM dada su utilidad en la caracterización del patrón metabólico de los sistemas sociales. En MuSIASEM, los elementos de *FONDO* son los elementos del sistema observado que son agentes de transformación que expresan las funciones requeridas por la sociedad. Los elementos de *FONDO* se utilizan pero no son totalmente consumidos; permanecen y deben seguir siendo “los mismos” a través de la duración del análisis. Ellos representan “lo que el sistema es” y “de lo que el sistema está hecho” (Giampietro y col., 2009). Ejemplos de elementos de *FONDO* son los

seres humanos (con consumo de energía endosomática), los usos y gestión de la tierra, los ríos y el capital tecnológico. La idea de la sustentabilidad implica que estos elementos de *FONDO* tienen que ser mantenidos y reproducidos en el proceso metabólico. Elementos de fondos corresponden (en cierta medida) a los factores de producción (mano de obra, capital, tierra) en la narrativa económica.

Los elementos de *FLUJO*, por el contrario, son aquellos elementos que aparecen o desaparecen (sus atributos se cambian) durante la duración del análisis, tales como salidas que son generadas o insumos que son consumidos por el proceso socio-ecológico. El análisis de la transformación de los elementos de *FLUJO* nos dice “lo que hace el sistema” en relación con su contexto/entorno (en la gran escala) y con respecto a sus componentes internos (a escala local). Ejemplos de elementos de flujo son el consumo y la producción de alimentos, la energía exosomática (energía fósil, electricidad), el agua (para beber, para uso doméstico, para riego, para procesos industriales) y otros materiales clave (Giampietro y col., 2009). En marcado contraste con el análisis tradicional de entradas/salidas de la producción (por ejemplo, la entrada de energía por unidad de producto, la huella de agua por unidad de cultivo producido, la intensidad energética de la economía), *MuSIASEM* siempre caracteriza los flujos en relación con los fondos (por ejemplo, la entrada de energía por hora de mano de obra, consumo de agua por hectárea de tierra en producción, el consumo de energía por año per cápita). Esta característica es esencial, ya que permite dar cuenta de la naturaleza especial y el tamaño del sistema bajo análisis (Giampietro y col., 2009).

La incorporación de los conceptos y las herramientas de los Sistemas Complejos mencionados son una alternativa para proponer nuevos enfoques para simular y evaluar las políticas de conservación y la inercia de la expansión urbana.

#### REFERENCIAS

- Aguilar, A.G. y C. Santos (2011a). “El manejo de asentamientos humanos irregulares en el suelo de conservación del Distrito Federal. Una política Urbana ineficaz”. En: *Periurbanización y sustentabilidad en grandes ciudades*. Ed. por A.G. Aguilar e I. Escamilla. Cámara de Diputados/UNAM-Instituto de Geografía/CONACYT/Miguel ángel Porrúa, México.

- Aguilar, A.G. y C. Santos (2011b). "Informal settlements' needs and environmental conservation in Mexico City: An unsolved challenge for land-use policy". En: *Land Use Policy* 28.4, págs. 649-662.
- Audirac, Ivonne (1999). "Unsettled views about the fringe: rural-urban or urban-rural frontiers". En: *Contested countryside: The rural urban fringe in North America*. Ed. por O. Furuseth y M. Lapping. Ashgate Aldershot, Hants, págs. 7-32.
- Ball, Philip (2008). *Masa crítica: caos, cambio y complejidad*. Fondo de Cultura Económica, México DF, pág. 598.
- Barsky, Andrés (2005). "El periurbano productivo, un espacio en constante transformación. Introducción al estado del debate, con referencias al caso de Buenos Aires". En: *Scripta Nova* 9.194, pág. 36. URL: <https://goo.gl/JYVJ93>.
- Batty, Michael y Stephen Marshall (2009). "Centenary paper: The evolution of cities: Geddes, Abercrombie and the new physicalism". En: *Town Planning Review* 80.6, págs. 551-574.
- Berg, Agnes E Van den y col. (2007). "Preference for nature in urbanized societies: Stress, restoration, and the pursuit of sustainability". En: *Journal of social issues* 63.1, págs. 79-96.
- Bjelland, Mark D y col. (2006). "The quest for authentic place: The production of suburban alternatives in Minnesota's St. Croix Valley". En: *Urban Geography* 27.3, págs. 253-270.
- Bryant, CR y col. (1982). *The city's countryside. Land and its management in the rural-urban fringe*. Longman, New York.
- Burgess, Ernest Watson (1926). *The Urban Community: Selected Papers from the Proceedings of the American Sociological Society, 1925*. University of Chicago Press.
- Campuzano, Enrique Pérez y col. (2011). *Suelo de conservación del Distrito Federal: ¿hacia una gestión y manejo sustentable?* Instituto Politécnico Nacional, Porrúa, México.
- Castelan, J.E. y A. Mejía (2011). "Política ambiental en el Suelo de Conservación del Distrito Federal". En: *Periurbanización y sustentabilidad en grandes ciudades*. Ed. por A.G. Aguilar e I. Escamilla. Cámara de Diputados / UNAM-Instituto de Geografía/CONACYT/Miguel ángel Porrúa: México, págs. 253-275.
- Champion, Tony (1998). "Studying counterurbanisation and the rural population turnaround". En: *Migration into Rural Areas: Theories and Issues*. Ed. por P. Boyle y K. Halfacree. Wiley, London, págs. 21-40.

- CONANP (2006). *Programa de Conservación y Manejo del Parque Nacional Desierto de los Leones*. Comisión Nacional de áreas Naturales Protegidas y Dirección General de la Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural, GDF, pág. 170.
- CURE (2003). *Sustainable development in the countryside around towns. Report TX171*. Centre for Urban y Regional Ecology (CURE), Cheltenham UK.
- Egan, A.F. y A.E. Luloff (2000). "The exurbanization of America's forests: Research in rural social science". En: *Journal of Forestry* 98.3, págs. 26-30.
- Escandón, C. J. (2014). "Ecología política urbana y suelo de conservación en la ciudad de México: Tlalpan como estudio de caso". Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias Políticas y Sociales con orientación en ciencia política. Tesis doct. Ciudad Universitaria, México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México, pág. 275.
- Fernández N., R.E. y M.L. Arreguín (2007). "Sinopsis de la flora del Valle de México". En: *Biodiversidad de la Faja Volcánica Transmexicana*. Ed. por I. Luna y col. UNAM y CONABIO, México DF, págs. 199-229.
- GDF (2000). *Programa General de Ordenamiento Ecológico del Distrito Federal (2000)*. Gaceta Oficial del Distrito Federal, 1 de agosto de 2000.
- Geels, Frank W (2005). "Processes and patterns in transitions and system innovations: refining the co-evolutionary multi-level perspective". En: *Technological forecasting and social change* 72.6, págs. 681-696.
- Giampietro, Mario y col. (2009). "Multi-scale integrated analysis of societal and ecosystem metabolism (MuSIASEM): Theoretical concepts and basic rationale". En: *Energy* 34.3, págs. 313-322.
- Giannini, Eli (1994). *Metroscape*. Royal Melbourne Institute of Technology.
- Hansen, Andrew J y col. (2005). "Effects of exurban development on biodiversity: patterns, mechanisms, and research needs". En: *Ecological Applications* 15.6, págs. 1893-1905.
- Hart, John Fraser (1995). "'Rural' and 'farm' no longer mean the same". En: *The changing American countryside*. Ed. por E. N. Castle. University Press of Kansas, Lawrence, págs. 63-76.
- Harvey, David (1990). *The condition of postmodernity: An enquiry into the conditions of cultural change*. Blackwell, London.
- (2007). *A brief history of neoliberalism*. Oxford University Press, USA.
- Henderson, G (2003). "What (else) we talk about when we talk about landscape: For a return to social imagination". En: *Everyday America: Cultural Landscape Studies after JB Jackson*. Ed. por C. Wilson y P. Groth. University of California Press, Berkeley.

- Heylighen, Francis (2008). "Complexity and Selforganization". En: *Encyclopedia of library and information sciences*. Taylor & Francis Group, New York, págs. 1215-1224.
- Heynen, Nik y col. (2006). "Urban political ecology: Politicing the production of urban natures". En: *The nature of cities: Urban political ecology and the politics of urban metabolism*. Ed. por María Kaika Nik Heynen y Erik Swyngedouw. Taylor Francis Group. London y New York, págs. 1-20.
- Kauffman, Stuart A (1991). "Antichaos and adaptation". En: *Scientific American* 265.2, págs. 78-84.
- Krafczyk, Daniel (2004). *The MetroScape: a geography of the contemporary city*. Harvard University Graduate School of Design, Cambridge.
- Kurtz, Richard A y Joanne B Eicher (1958). "Fringe and suburb: a confusion of concepts". En: *Social Forces*, págs. 32-37.
- Lepczyk, Christopher A y col. (2007). "Spatiotemporal dynamics of housing growth hotspots in the North Central US from 1940 to 2000". En: *Landscape Ecology* 22.6, págs. 939-952.
- Lindstrom, Matthew J y Hugh Bartling (2003). *Suburban sprawl: Culture, theory, and politics*. Rowman & Littlefield.
- McGlade, J. y col. (2006). "Industrial resilience and decline: A co-evolutionary framework". En: *Complexity and co-evolution: Continuity and change in socio-economic systems*. Ed. por E. Garnsey y J. McGlade. Edward Elgar Publishing, págs. 147-176.
- Perevochtchikova, María y Adrián Vázquez (2012). "The federal program of payment for hydrological environmental services as an alternative instrument for integrated water resources management in Mexico city". En: *The Open Geography Journal* 5, págs. 35-46.
- Portugali, Juval (2006). "Complexity theory as a link between space and place". En: *Environment and Planning A* 38.4, págs. 647-664.
- Ravetz, Joe (2001). *City Region 2020: integrated planning for a sustainable environment*. Earthscan, London.
- (2011). "Peri-urban ecology: green infrastructure in the 21st century metro-scape". En: *Handbook of urban ecology*. Ed. por Douglas I. Routledge, Oxford.
- Ravetz, Joe y col. (2013). "The dynamics of peri-urbanization". En: *Peri-urban futures: Scenarios and models for land use change in Europe*. Springer, págs. 13-44.
- Robbins, Paul (2005). *Political ecology*. Oxford, Blackwell Publishing.
- Robinson, G (1990). *Conflict and change in the countryside. Rural society, economy and planning in the developed world*. Belhaven Press, London.

- Roo, Gert de y Ward S Rauws (2012). "Positioning planning in the world of order, chaos and complexity: On perspectives, behaviour and interventions in a non-linear environment". En: *Complexity theories of cities have come of age*. Springer, págs. 207-220.
- Roo, Gert de y Elisabete A Silva (2010). *A planner's encounter with complexity*. Ashgate Publishing, Ltd.
- Rueda Palenzuela, S. (1995). *Ecología urbana. Barcelona i la selva regió metropolitana con a referents*. Beta Editorial, Barcelona.
- Saavedra, Zenia y col. (2011). "Identification of threatened areas of environmental value in the Conservation Area of Mexico City, and setting priorities for their protection". En: *Investig. Geogr* 74, págs. 19-34.
- Smith, Thomas Lynn (1937). *The population of Louisiana: its composition and changes*. Vol. 293. Louisiana State University, Agricultural y Mechanical College, Agricultural Experiment Stations.
- Soja, Edward W (2000). *Postmetropolis Critical studies of cities and regions*. Blackwell, Oxford.
- Spectorsky, Auguste C y Robert Osborn (1955). *The exurbanites*. Lippincott, Philadelphia.
- Swyngedouw, Erik (2006). "Metabolic Urbanization: The Making of Cyborg Cities". En: *In the Nature of Cities: Urban Political Ecology and the Politics of Urban Metabolism*. Ed. por E. Swyngedouw N. Heynen M. Kaika. Routledge, London, págs. 21-40.
- Taylor, Laura Elizabeth (2007). "The production of nature in planning for urban expansion: A cultural landscape study of new urban growth in Oakville, Ontario". Tesis doct. University of Toronto.
- (2011). "No boundaries: Exurbia and the study of contemporary urban dispersion". En: *GeoJournal* 76.4, págs. 323-339.
- Theobald, David M (2001). "Land-use dynamics beyond the American urban fringe". En: *Geographical Review* 91.3, págs. 544-564.
- (2004). "Placing exurban land-use change in a human modification framework". En: *Frontiers in Ecology and the Environment* 2.3, págs. 139-144.
- (2005). "Landscape patterns of exurban growth in the USA from 1980 to 2020". En: *Ecology and Society* 10.1.
- Velázquez, A. y F. Romero (1999). *Biodiversidad de la Región de Montaña del Sur de la Cuenca de México*. UAM/SMA/GDF.
- Waltner-Toews, David y col. (2008). *The ecosystem approach: complexity, uncertainty, and managing for sustainability*. Columbia University Press.

Zuiderhoudt, R y col. (2002). "De logica van chaos in veranderingsprocessen [The logic of chaos in processes of change]". En: *Holland Management Review* 83, págs. 59-67.

## SISTEMAS SOCIO-ECOLÓGICOS URBANOS Y ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS: CARACTERIZACIÓN DE LA METRÓPOLI DE GUADALAJARA, MÉXICO

*Gabriela de la Mora\**

### INTRODUCCIÓN

LA compleja conexión entre sistemas sociales y ecológicos está mediada por múltiples aspectos físicos, relaciones de dependencia (ciclos de nutrientes), así como relaciones mutualistas y antagónicas (Cumming y col., 2010, p. 415). Los sistemas socio-ecológicos o también denominados sistemas acoplados (Turner y col., 2003) conceptualizan y estudian procesos continuos de interacción entre los sistemas biofísicos y sociales bajo una óptica co-evolutiva (Fischer-Kowalski y Weisz, 1999). Los sistemas naturales se integran a través de los flujos de materiales y energía; mientras que los sociales lo hacen a través de flujos de información y comunicación. En los hechos, la integración y coordinación de ambos componentes es difícil, lo que se manifiesta en la degradación ambiental que se experimenta a nivel planetario. El análisis del funcionamiento de los sistemas socio-ecológicos ha permitido desarrollar diversas líneas de investigación vinculadas al manejo sustentable de los recursos naturales desde la perspectiva institucional, los derechos de propiedad, el manejo adaptativo, las redes sociales y la gobernanza policéntrica (Berkes y col., 2000; Adger y Jordan, 2009; Ostrom, 2010a; Ostrom, 2010b; Henry y Dietz, 2011). En este trabajo se explora este último planteamiento teórico para analizar las acciones que llevan a cabo actores sociales clave en la ciudad de Guadalajara en México, para gestio-

---

\*Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Cuernavaca.

nar<sup>1</sup> un conjunto de áreas naturales protegidas<sup>2</sup> que están en interacción con el sistema urbano.

Se entiende por sistemas policéntricos a las redes de centros de toma de decisiones que pueden interconectarse por medio de relaciones territoriales y funcionales, a través de las cuales se generan relaciones competitivas o cooperativas en múltiples niveles (McGinnis, 1999; Andersson y Ostrom, 2008; Ostrom, 2010b; Taminiou y Byrne, 2015). Ostrom consolidó un meta-análisis para comprender el funcionamiento de las estructuras de gobernanza en las que hay una superposición o traslape de jurisdicciones. El policentrismo refiere a unidades territoriales que permiten la colaboración en la gestión, la planificación estratégica y la toma de decisiones conjunta, generando estructuras híbridas de gobernanza que activamente reconfiguran y redistribuyen la autoridad en los procesos de gestión del territorio y los recursos naturales que estos albergan (Taminiou y Byrne, 2015; Finka y col., 2015). Bajo esta óptica, las explicaciones estatísticas tradicionales ceden lugar a una teoría de la acción colectiva fundada en la participación de los usuarios de los recursos de uso común en la toma de decisiones a partir de procesos de autoorganización (Ostrom, 2010a; Ostrom, 2010b; Ostrom, 2012). Al trasladar ese análisis a espacios urbanos, entendidos como los ecosistemas dominados por humanos cuyos valores, nivel de riqueza, estilos de vida, formas de uso de los recursos naturales y nivel de consumo

---

<sup>1</sup>Se entiende por gestión al conjunto de acciones emprendidas por actores públicos, privados y sociedad civil que contribuyen a preservar, restaurar, conservar y utilizar de manera sustentable el medio ambiente (Rodríguez Becerra Manuel, (2002), *Gestión ambiental en América Latina y El Caribe: Evolución, tendencias y principales prácticas*. Edit. BID, Departamento de Desarrollo Sostenible. División de Medio Ambiente. Washington, USA. Último acceso 01 de Septiembre de 2014. <http://www.cebem.org/cmsfiles/publicaciones/gestionambientalLACaribe.pdf>)

<sup>2</sup>Un área natural protegida (ANP) es un espacio geográfico claramente definido, reconocido y manejado mediante medios legales o de otro tipo, para lograr la conservación a largo plazo de la naturaleza y de los servicios ecosistémicos y valores culturales asociados (Borrini-Feyerabend, G., N. Dudley, T. Jaeger, B. Lassen, N. Pathak Broome, A. Phillips and T. Sandwith. (2013). *Governance of Protected Areas: From understanding to action*. Best Practice Protected Area Guidelines Series No. 20, Gland: 5). La Convención sobre Diversidad Biológica define que un área protegida es la zona definida geográficamente que ha sido designada o regulada y administrada a fin de alcanzar objetivos específicos de conservación (Art. 2 CDB). La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) define que las áreas naturales protegidas son las zonas de territorio nacional y aquéllas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción, en donde los ambientes originales no han sido significativamente alterados por la actividad del ser humano o que requieren ser preservadas y restauradas y están sujetas al régimen previsto en esa misma ley (Art.3, LGEEPA).

en los que se generan diversos procesos y dinámicas de degradación ambiental (McDonnell y Pickett, 1990; Grimm y col., 2000); se busca indagar las acciones planteadas por los actores sociales locales para paliar o evitar la degradación ambiental causada por el crecimiento sin control de las ciudades y de esta forma contribuir al mantenimiento de servicios ambientales<sup>3</sup> vitales para los habitantes urbanos.

Para llevar a cabo lo anterior, primeramente se definen las áreas naturales protegidas del sistema socio-ecológico de la ciudad de Guadalajara y posteriormente se analizan las acciones que llevan a cabo actores sociales clave con la finalidad de lograr la integración del sistema ecológico con el urbano. La hipótesis de trabajo es que la fragmentación y la falta de integración de los procesos de toma de decisiones relacionados con la gestión del sistema de áreas naturales protegidas y del sistema urbano, ha llevado a que actores de la sociedad civil exploren estrategias ciudadanas y locales a favor de la conservación de esos espacios naturales, obligando a actuar a las autoridades gubernamentales de los distintos órdenes de gobierno en ese sentido.

## MÉTODOS

Esta es una investigación cualitativa de carácter exploratorio sobre las acciones que llevan a cabo actores sociales clave relacionados con la conservación de siete áreas naturales protegidas en el área metropolitana de Guadalajara. Para responder la hipótesis de trabajo, se llevó a cabo la revisión documental de diversos materiales disponibles especializados en temas de conservación y gobernanza de áreas naturales protegidas en zonas urbanas; poniendo especial énfasis en la información de las siete áreas protegidas que forman parte del sistema socio-ecológico de estudio. Dicho sistema se definió a partir de los criterios de: 1) proximidad geográfica al área urbana, 2) existencia de un decreto gubernamental de protección (federal, estatal o municipal) y 3) percepción de los actores clave entrevistados sobre la relevancia ecológica de esas áreas. Asimismo, se llevaron a cabo veintio-

---

<sup>3</sup>Los servicios ecosistémicos son los beneficios que la gente obtiene de los ecosistemas. Existen al menos cuatro categorías de servicios 1) los de provisión (de alimentos, agua, recursos genéticos, etc.); 2) los de regulación (del clima, de inundaciones, polinización, etc.); 3) los culturales (beneficios con valor cultural, espiritual o recreacional); 4) de soporte (como el ciclo de nutrientes y aquellos que mantienen las condiciones de vida en la tierra) (MEA. Millennium Ecosystem Assessment. (2003). *Ecosystem and their services*. Ecosystems and Human Well-Being. A framework for assessment. United Nations Development Program. Island Press. USA. <http://www.unep.org/maweb/documents/document.356.aspx.pdf>)

cho entrevistas a actores clave que participan en los procesos de toma de decisiones relacionados con la gestión del sistema de áreas protegidas en cuestión. Entre los entrevistados están: directores o encargados de administrar las áreas protegidas del área metropolitana de Guadalajara; funcionarios de los distintos órdenes de gobierno relacionados con el tema ambiental y de conservación; académicos, activistas y miembros de organizaciones civiles, asociaciones vecinales, entre otros. Las entrevistas se grabaron en audio, se transcribieron, se sistematizaron y analizaron utilizando el software Atlas.Ti (versión 1.0.24) empleando las categorías sobre los sistemas policéntricos definidas a partir de los trabajos de (Ostrom y col., 1961) y (Ostrom, 2010a).

#### CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE ANP DE GUADALAJARA

En México se han decretado áreas naturales protegidas con la finalidad de conservar o restaurar bosques cercanos a las zonas urbanas desde finales del siglo XIX. En Guadalajara el gobernador Luis del Carmen Curiel (1846-1913) fue precursor de este tipo de iniciativas, al proteger varios manantiales cercanos a la ciudad a fin de asegurar el abastecimiento de agua (Entrevista Personal, JEL, 2015). Con la expansión de la urbe se han sacrificado esos espacios, que erróneamente son considerados disponibles para el crecimiento, en detrimento de la provisión y mantenimiento de servicios ambientales vitales para los habitantes de las ciudades.

En México 72 % de la población vive en ciudades y 57 % habita en alguna de las cincuenta y nueve zonas metropolitanas, donde operan diferentes estructuras jurídico-políticas y normas urbanas; además, no existen marcos institucionales que articulen ni coordinen el desarrollo urbano y metropolitano con la conservación de espacios naturales, lo que tiende a fomentar una gestión fragmentada (ONU-Hábitat, 2011, p. 75). Muestra de lo anterior es que las ciudades con mayor concentración de población en México presentan estrés hídrico y contaminación (atmosférica, de suelos, agua, etc.). Resolver esta problemática requiere lograr acuerdos y generar estrategias de comunicación entre los distintos órdenes de gobierno (municipal, estatal y federal) así como diferentes sectores de la sociedad local, a fin de asegurar conjuntamente la permanencia y conservación de las áreas naturales protegidas y un desarrollo urbano planificado y sustentable.

Jalisco ocupa el tercer lugar a nivel nacional por el volumen de producción industrial. Su capital, Guadalajara, concentra 75 % de las actividades económicas del estado. El área metropolitana de Guadalajara abarca 2,700

km<sup>2</sup> de superficie<sup>4</sup> y concentra 61 % de la población total del estado (casi 4.5 millones de habitantes). Se localiza en la región hidrológica Lerma-Santiago, en la cuenca del Alto Santiago, en la microcuenca de Atemajac. Los acuíferos subterráneos de esa micro-cuenca se encuentran sobreexplotados y los superficiales presentan altos niveles de contaminación (Semarnat, 2010, pp. 4 y 71).

A nivel estatal cerca de 858 mil hectáreas de superficie están bajo alguna categoría de protección ecológica<sup>5</sup>, 2.4 % corresponde a áreas naturales protegidas por gobiernos municipales; 7 % son administradas por el gobierno del estado y 90.5 % de esa superficie es administrada por el gobierno federal. 52 % de la superficie protegida en Jalisco es propiedad de ejidos y comunidades, 44 % corresponde a propiedad privada y 4 % es federal<sup>6</sup> y estatal. Sin embargo, existen superficies bajo protección, de las que se desconoce su régimen de propiedad (GEJ, 2015).

La superficie protegida en el área metropolitana suma poco más de 83 mil hectáreas de las cuales 36 % es co-administrada por la federación y el gobierno del estado<sup>7</sup>; 38.2 % por el gobierno estatal<sup>8</sup> y 24.4 % por gobiernos

<sup>4</sup>Abarca ocho municipios: Guadalajara, Ixtlahuacán de los Membrillos, Juanacatlán, El Salto, Tlajomulco de Zúñiga, Tlaquepaque, Tonalá y Zapopan.

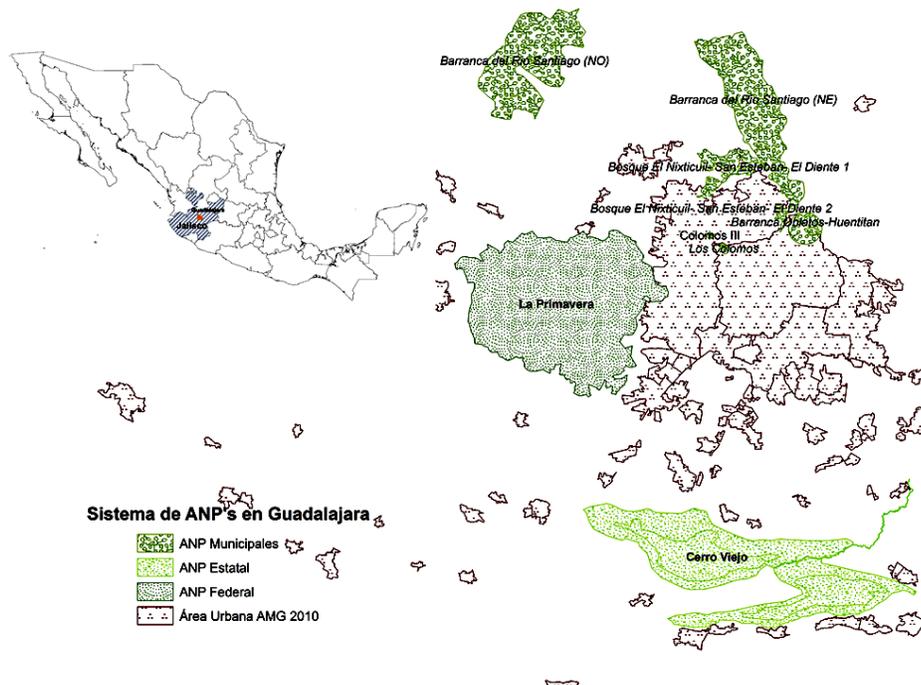
<sup>5</sup>Esta cifra no incluye la superficie de sitios Ramsar (humedales) que representan 154 mil hectáreas, ni la de Santuarios que es de 88 kilómetros lineales de litoral.

<sup>6</sup>La superficie total protegida por la federación incluye las Reservas de la Biosfera Sierra de Manantlán y Chamela-Cuixmala; el Parque Nacional Volcán Nevado de Colima (que comparten Colima y Jalisco); las Áreas de Protección de Flora y Fauna Sierra de Quila y La Primavera (estas tres últimas son administradas coordinadamente por la federación y el gobierno de Jalisco) (González-Franco de la Peza Rafael, Rosas Hernández Martha Ileana, Jaramillo Monroy Fernando. (2004). *Diagnóstico del estado actual y gestión para las áreas naturales protegidas del estado de Jalisco: Nevado de Colima, Sierra de Quila y Bosque La Primavera*. Octubre-Diciembre. Gobierno del Estado de Jalisco. México. 320 pp.); y la superficie correspondiente a Jalisco de la Cuenca Alimentadora del Distrito Nacional de Riego 043 que Jalisco comparte con Nayarit (Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial. Gobierno del Estado de Jalisco, México, 2014).

<sup>7</sup>Se refiere específicamente al Área de Protección de Flora y Fauna Bosque La Primavera que abarca 30,500 hectáreas, la cual fue decretada el 6 de marzo de 1980. En 1995 la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (Semarnap -hoy Semarnat-) y el gobierno de Jalisco establecieron un acuerdo de coordinación para transferir la administración de esta área al gobierno del estado por un periodo de tiempo limitado, con la finalidad de realizar coordinadamente acciones de restauración, conservación, desarrollo y vigilancia en el área. En 2000 se firmó un acuerdo de coordinación permanente, que actualmente está vigente (González-Franco de la Peza y col., 2004).

<sup>8</sup>Se trata del Área Estatal de Protección Hidrológica Cerro Viejo-Chupinaya-Los Sabinos que abarca una superficie de 32,129 hectáreas y fue decretada el 18 de mayo de 2013.

municipales<sup>9</sup>. Son siete áreas naturales protegidas con distintas categorías de manejo y protección, algunas de ellas se localizan en la periferia urbana, tal es el caso de la Barranca del Río Santiago, el Bosque El Nixticuil, la Barranca Oblatos-Huentitán, el Bosque la Primavera y Cerro Viejo. Otras áreas son enclaves naturales en la ciudad, como el Bosque Los Colomos y el Bosque Colomos III (Ver Figura 1: Sistema de áreas naturales protegidas en Guadalajara).



**Figura 1:** Sistema de áreas naturales protegidas en Guadalajara. Fuente: elaboración propia con información de bases de datos geográficas de Conabio, Inegi y Semadet.

Cada una de estas áreas tiene su propia historia, características ecoló-

<sup>9</sup>Se refiere a la Zona Sujeta a Conservación Ecológica Barranca de Oblatos-Huentitán que abarca una superficie de 1,136.92 hectáreas y fue decretada el 5 de junio de 1997; así como las Áreas Municipales de Protección Hidrológica: Barranca del Río Santiago de 17,729.91 hectáreas decretada el 7 de octubre de 2004; el Bosque Los Colomos con 90.72 ha. decretado el 26 de junio de 2007; el Bosque El Nixticuil-San Esteban-El Diente (Bensedi) de 1,591.39 hectáreas decretada el 6 de marzo de 2008 y el Bosque Pedagógico del Agua o Colomos III con 36.40 hectáreas que fue decretado el 26 de septiembre de 2014.

gicas específicas, una evolución institucional particular y enfrentan retos en su administración y operación. No obstante, comparten problemáticas como la presión por el cambio de uso de suelo resultado de la expansión urbana; la fragmentación de los ecosistemas a causa de la construcción de infraestructura urbana; y en mayor o menor medida, la falta de recursos financieros, humanos y técnicos para su operación, entre otros.

Otro elemento en común, es la participación de la sociedad civil (organizada formal o informalmente) en la defensa de una o varias de esas áreas. Estos grupos llevan a cabo diversas acciones con la finalidad de mantener y hacer respetar la integridad de esos espacios naturales en el área metropolitana. Se trata de asociaciones civiles, grupos de vecinos, ejidos, comunidades e individuos, que habitan en esas áreas, cerca de ellas o que simplemente tienen interés por mantener esos espacios. Ellos promueven y participan en campañas de reforestación, acciones de restauración e investigación; además de difundir información en medios de comunicación (televisión, prensa, radio y redes sociales) sobre lo que acontece en esas áreas bajo protección. Gracias a la participación de la sociedad civil, se ha logrado incluir el tema de la conservación en las agendas de los distintos órdenes de gobierno, además de exigir el cumplimiento de los decretos de protección.

Estas organizaciones mantienen presencia en varias áreas naturales protegidas, incluso en algunas localizadas fuera del Área Metropolitana, formando redes y agrupaciones que denominan frentes. El propósito de estos frentes es fortalecer mutuamente sus acciones e influencia social y política ante las autoridades municipales, estatales y en menor medida federales, para lograr que actúen a favor de la conservación de esos espacios naturales. En varios casos, organizaciones y colectivos locales han exigido a las autoridades el decreto de nuevas áreas naturales protegidas en espacios en riesgo de ser urbanizados o en los que existen proyectos de urbanización, tal es el caso del Bosque El Nixticuil, la Barranca de Huentitán y Los Colomos III.

El sector académico representado por profesores e investigadores de educación media y superior fundamentalmente de la Universidad de Guadalajara (UdeG) y del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (Iteso), entre otras; generan conocimientos científicos y técnicos sobre el estado de los ecosistemas y su interacción con la sociedad. Esa información busca fortalecer los procesos de toma de decisiones en el ámbito de la gestión gubernamental estatal y municipal, además de proporcionar información a la opinión pública local sobre la relevancia de esos ecosiste-

mas y su conservación. Es destacable el papel de varios académicos, quienes individual o colectivamente, llevan a cabo acciones de activismo social y ambiental en varias áreas protegidas de la región.

La colaboración entre el sector académico y las organizaciones sociales, aunada a la voluntad política de funcionarios gubernamentales formados por profesores universitarios involucrados en la investigación acción en materia de conservación, ha sido clave para impulsar nuevas declaratorias de protección. Tal es el caso del Bosque Los Colomos III en Zapopan, donde tras varios años de lucha, se logró decretar un área de protección hidrológica municipal. Los promotores de esas iniciativas, saben que los decretos por sí mismos no aseguran el cumplimiento de los objetivos de conservación. Por ello, dan seguimiento puntual a las acciones de las autoridades, sobre todo municipales, para evitar que sus decisiones (por omisión o ignorancia) contravengan el propósito de las declaratorias. Asimismo, las organizaciones de la sociedad civil y el sector académico fomentan actividades participativas de restauración, reforestación y limpieza en esas áreas, con el propósito de promover la apropiación social y sustentable de esos espacios, así como una cultura a favor de la conservación.

Por su parte, los funcionarios gubernamentales encargados de la administración de las áreas protegidas enfrentan retos importantes para lograr su adecuada gestión a causa de la poca solidez institucional y de la falta de mecanismos de gobernanza que integren y concilien las distintas voces e intereses sobre el tipo de manejo que se debe dar al territorio bajo conservación. El Bosque La Primavera es el que presenta un marco institucional relativamente más sólido, ya que cuenta con personal y presupuesto especialmente designado para su administración. Mientras que el área estatal Cerro Viejo-Chupinaya, en 2016 se le asignó por primera vez un millón de pesos para ejecutar acciones de conservación con los propietarios ((Sema-det, 2016), Entrevista Personal MRM 2016); sin embargo no se ha logrado la coordinación entre las autoridades municipales que están involucradas territorialmente (Estrada, 2016).

La participación de las autoridades ambientales municipales en temas de conservación sobre todo se evidencia en los casos de Zapopan, Guadalajara y Tlajomulco; sin embargo, en municipios rurales como Tala y El Arenal, el personal dedicado al tema ecológico y ambiental es muy limitado. En el caso de las áreas municipales protegidas, municipios como Zapopan cuentan con personal dedicado especialmente a este tema, incluso existe un grupo especializado en el combate de incendios que presta sus servicios en otras áreas cuando se necesita (Entrevista Personal, MMdS 2013). Al tiem-

po que las autoridades de este municipio da relevancia a la conservación, también al interior de la administración municipal se promueven y dan permisos para el cambio de uso suelo, problemática que sobre todo se evidencia en el Bosque El Nixticuil. Por su parte, el municipio de Guadalajara sólo ha asignado personal para atender el Bosque Los Colomos (Entrevista Personal JCVB 2013), el que no necesariamente tiene interés y experiencia en el tema de la conservación.

Pese al esfuerzo de distintos actores sociales y de gobierno, la acción colectiva registrada en el área metropolitana de Guadalajara, aún no deriva en una gestión integrada o sistémica de las áreas naturales protegidas administradas por los distintos órdenes de gobierno. Sin embargo, voces desde la academia, las asociaciones civiles y algunos funcionarios de gobierno, buscan impulsar políticas que conciban a estas áreas de manera conjunta para lograr su conservación y favorecer así, la provisión y mantenimiento de servicios ambientales y evitar una mayor fragmentación de hábitats.

#### ACCIÓN SOCIAL COMO IMPULSORA DE UN SISTEMA DE ANP URBANO

La idea e interés por construir un sistema metropolitano de áreas naturales protegidas en Guadalajara está presente en algunos actores sociales clave interesados en la conservación. La expectativa es lograr trascender las restricciones que surgen con los cambios de las administraciones estatales y municipales, además de mantener la vigencia de las políticas públicas de conservación que permitan dar seguimiento y conservar estas áreas en el mediano y largo plazos. En la actualidad, la gestión y manejo de los espacios naturales protegidos desde una perspectiva metropolitana, no está integrada ni coordinada, incluso los mecanismos de gobernanza de cada una de ellas se encuentran en construcción. Por lo tanto, no existen acciones y políticas concretas que reconozcan las interdependencias del sistema socio-ecológico; más bien se trata de una gestión fragmentada en múltiples componentes. Sin embargo, los vínculos entre la sociedad civil (representada por individuos y organizaciones, activistas y académicos) que están interesados y trabajando en distintas áreas protegidas, ha posibilitado el intercambio de información y experiencias, con la finalidad de dar seguimiento al cumplimiento de los compromisos asumidos por las autoridades gubernamentales principalmente, respecto a la conservación de esas áreas.

Un aspecto destacable del caso de estudio, es el papel que juega la sociedad civil en la construcción de una política pública de conservación a nivel metropolitano. Una de las evidencias más claras, es la promoción de

declaratorias de áreas naturales protegidas bajo la justificación de mantener la conexión ecológica con otras áreas bajo conservación ya decretadas, y como una forma de contener la expansión urbana. Estos grupos reconocen que las declaratorias por sí mismas no garantizan la protección de esas áreas; sino que se trata del inicio de un nuevo proceso en el que se vigila y denuncia la actuación de las autoridades y otros agentes económicos (p.e. los desarrolladores inmobiliarios) que incumplen los decretos, ya sea por la vía jurídica o a través de los medios de comunicación y las redes sociales.

Crecientemente estas organizaciones promueven propuestas para que se reconozca la interdependencia de los ecosistemas que componen el sistema de áreas protegidas, con el sistema urbano y social, valiéndose de distintos instrumentos de política pública y planeación territorial. En la medida en que los actores sociales involucrados en la toma de decisiones reconozcan la interdependencia de los sistemas naturales y urbanos, se favorecerá la adopción de una óptica metropolitana de conservación de áreas protegidas que asegure el mantenimiento y provisión de los servicios ambientales que éstas producen.

#### AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue realizada gracias al Programa UNAM-DGAPA-PAPIIT Clave IA300516.

#### REFERENCIAS

- Adger, W Neil y Andrew Jordan (2009). *Governing sustainability*. Cambridge University Press.
- Andersson, Krister P y Elinor Ostrom (2008). "Analyzing decentralized resource regimes from a polycentric perspective". En: *Policy sciences* 41.1, págs. 71-93.
- Berkes, Fikret y col. (2000). *Linking social and ecological systems: management practices and social mechanisms for building resilience*. Cambridge University Press.
- Cumming, Graeme S y col. (2010). "Network analysis in conservation biogeography: challenges and opportunities". En: *Diversity and Distributions, A Journal of Conservation Biogeography* 16.3, págs. 414-425.
- Estrada, Aarón (2016). <https://goo.gl/jnOkZz>. Cerro Viejo vulnerable pese a declaratoria de Área de Protección Hidrológica. Semanario La Verdad. 18 de mayo. Online, última consulta 15 de julio de 2016.

- Finka, Maroš y col. (2015). "Concept of Polycentric Governance for Fuzzy Soft Spaces as a Challenge for Central European Peripheral Spaces". En: *Understanding Geographies of Polarization and Peripheralization: Perspectives from Central and Eastern Europe and Beyond*. Ed. por Thilo Lang y col. London: Palgrave Macmillan UK, págs. 309-322.
- Fischer-Kowalski, Marina y Helga Weisz (1999). "Society as hybrid between material and symbolic realms". En: *Advances in human ecology* 8, págs. 215-251.
- GEJ (2015). Generalidades, Gobierno del Estado de Jalisco.
- González-Franco de la Peza, Rafael y col. (2004). *Diagnóstico del estado actual y gestión para las áreas naturales protegidas del estado de Jalisco: Nevado de Colima, Sierra de Quila y Bosque La Primavera*. Gobierno del Estado de Jalisco. México, pág. 320.
- Grimm, Nancy B y col. (2000). "Integrated Approaches to Long-Term Studies of Urban Ecological Systems". En: *Urban Ecology. An international perspective on the interaction between humans and nature*. Ed. por John M. Marzluff y col. Springer, USA.
- Henry, Adam y Thomas Dietz (2011). "Information, networks, and the complexity of trust in commons governance". En: *International Journal of the Commons* 5.2.
- McDonnell, Mark J y Stewart TA Pickett (1990). "Ecosystem structure and function along urban-rural gradients: an unexploited opportunity for ecology". En: *Ecology* 71.4, págs. 1232-1237.
- McGinnis, Michael Dean (1999). *Polycentric governance and development: Readings from the workshop in political theory and policy analysis*. University of Michigan Press, USA.
- ONU-Hábitat (2011). *Estado de las ciudades de México*. Hábitat-ONU, Sedesol, México.
- Ostrom, Elinor (2010a). "A long polycentric journey". En: *Annual Review of Political Science* 13, págs. 1-23.
- (2010b). "Beyond markets and states: polycentric governance of complex economic systems". En: *Transnational Corporations Review* 2.2, pág. 1.
- (2012). "Nested externalities and polycentric institutions: must we wait for global solutions to climate change before taking actions at other scales?" En: *Economic theory* 49.2, págs. 353-369.
- Ostrom, Vincent y col. (1961). "The organization of government in metropolitan areas: a theoretical inquiry". En: *American political science review* 55.04, págs. 831-842.

- Semadet (2016). <https://goo.gl/wj11wZ>. Online: Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial-Gobierno del Estado de Jalisco. Consultado el 01/08/2016.
- Semarnat (2010). [http://www.ceajalisco.gob.mx/pdf/phej\\_2030.pdf](http://www.ceajalisco.gob.mx/pdf/phej_2030.pdf). Online: Programa Hídrico Visión 2030 del Estado de Jalisco. Serie Planeación Hidráulica en México. Componente: Planeación Regional y Estatal. Consultado el 28/02/2015.
- Taminiau, J y J Byrne (2015). *A polycentric response to the climate change challenge relying on creativity, innovation, and leadership*. A position paper for UNFCCC COP-21 Paris, France (30 November-11 December).
- Turner, Billie Lee y col. (2003). "Illustrating the coupled human-environment system for vulnerability analysis: three case studies". En: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 100.14, págs. 8080-8085.

## CIUDAD VIVA: POR UNA PLANEACIÓN URBANA CADA VEZ MÁS CIENTÍFICA

*Aleida Rueda\**

EL futuro tiene cara de ciudad. Hasta hace unos años la población mundial que vivía en zonas rurales había superado a la que habitaba en ciudades. Y un día, en 2008, la proporción se invirtió. De acuerdo con un informe de Naciones Unidas de 2014, el 54 % de la población mundial vive hoy en centros urbanos. Y la tendencia es que siga en aumento. Eso no sería un problema si el incremento de gente en las urbes fuera proporcional a la capacidad de estas para recibirla. Es decir, si al mismo tiempo que aumentan en tamaño y población también creciera el conjunto de transformaciones planeadas y aplicadas para favorecer su propia sobrevivencia y una aceptable calidad de vida para sus habitantes, la imagen de un mundo más urbanizado probablemente no sería tan preocupante.

Lo cierto es que están sucediendo cosas en esa línea. Hay buenos ejemplos de soluciones creativas para reducir, por ejemplo, el consumo de energía, agua, desperdicios o emisiones de gases nocivos para el ambiente. Pero quizás uno de los aportes más novedosos ha sido una línea de investigación, que, aderezada por estudios desde distintas ciencias, se plantea resolver los problemas que aquejan a las ciudades desde una perspectiva distinta: viéndolas como organismos vivos.

La analogía podría parecer simple: las ciudades se reducen a un grupo de individuos que un buen día se establecen en un determinado espacio geográfico; como las células de cualquier organismo, cada uno empieza a llevar a cabo una función para que el colectivo funcione; con el tiempo, se especializan, sus funciones se vuelven más sofisticadas. El grupo crece, se reproduce. La villa se convierte en poblado, el poblado en ciudad, la ciudad madura, se vuelve tan grande que se 'reproduce', es decir, da a luz otras ciudades que siguen un camino similar. Hasta ahí la historia tiene gracia: una bella familia de ciudades que se multiplica. Pero entonces aparece el con-

---

\*Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México

flicto de la analogía, o al menos la disyuntiva: ¿se multiplica (se renueva) infinitamente como las células madre? ¿O hay, como en la mayoría de los organismos, un límite? Así como un organismo nace, crece, se reproduce y muere, ¿ocurre lo mismo con las ciudades? ¿las ciudades también mueren? ¿Ocurren procesos parecidos en el desgaste de sus funciones? Y si los hay, ¿hay forma de prevenirlos?

Ciencias que hasta hace poco estaban alejadas de la planeación de la ciudad y el urbanismo -como la física o la biología- han propuesto formas distintas de ver una ciudad que probablemente podrían modificar la forma de planearla, cuidarla, hacerla más sustentable y construir un futuro más halagüeño para el mundo urbanizado<sup>1</sup>.

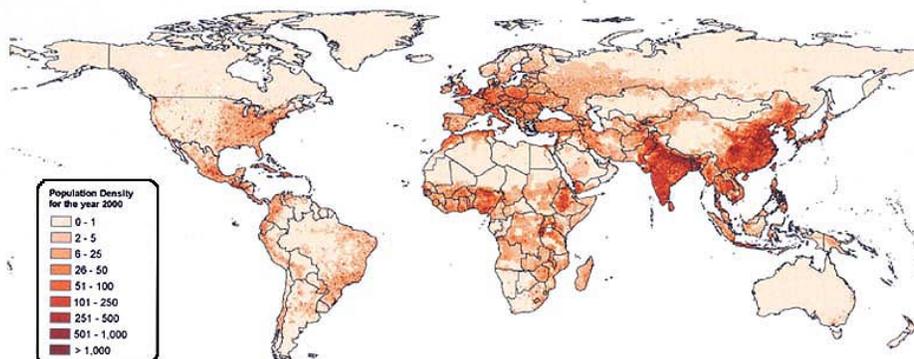
#### LA TENDENCIA PARA VIVIR: CIUDADES

Una ironía aparece en el momento en que pensamos en los problemas de las ciudades. A pesar de su tráfico y su ruido, su mal manejo de residuos y sus malos olores, sus aglutinamientos y su desigualdad, sus crisis de salud pública y su delincuencia, y por supuesto, su alto costo de vida en comparación con el de las áreas rurales, ¿por qué hay cada vez más gente viviendo en ellas? De acuerdo con el reporte más actualizado del Instituto Nacional de Estadística, Geografía (INEGI, 2010), en México pasamos de un 43 % de población urbana en 1950, a 71 % en 1990, y un 78 % en 2010. De los 120 millones de mexicanos que viven en el país, cerca de 90 millones de ellos viven en ciudades. Sucede en México, pero también prácticamente en todo el mundo. En menos de un siglo, las ciudades crecieron más de 10 veces. De 250 millones de personas viviendo en centros urbanos a inicios del siglo XX, pasamos a 3 mil 500 millones. Es decir, hace apenas un siglo solamente dos de 10 habitantes vivía en ciudades, el resto vivía en áreas rurales.

Hoy, de acuerdo con datos de la Organización de Naciones Unidas: “por primera vez en la historia, la población urbana superó a la rural”. La organización reporta que para 2050 la cantidad de gente viviendo en ciudades llegará a los 6 mil millones. Siete de cada 10 personas que vivan en el planeta, lo harán en centros urbanos (ONU-Habitat, 2012).

---

<sup>1</sup>Este artículo es una versión extendida del guión del programa de televisión “Ciudad ¡Viva!” que forma parte de la serie “Ciencia de la ciudad” (hoy “Ciencia en todos lados”) producido por la productora independiente Inmedia y transmitido por el Canal 30 del Sistema Público de Radiodifusión del Estado Mexicano. El programa se transmitió durante 2012 y 2013, y ganó el Premio Nacional de Divulgación Periodística en Sustentabilidad 2013.



**Figura 1:** Mapa de la población urbana y rural en 2000 (FAO, 2000)

La razón del porqué la mayoría de la gente en el planeta ha decidido vivir en una ciudad no resulta tan difícil imaginar. De hecho, hay cada vez más investigación multidisciplinaria en torno a eso que hace que las ciudades se vuelvan más y más atractivas. En términos generales, es su actividad económica y, en consecuencia, la promesa de prosperidad y de una mejor calidad de vida, lo que las vuelve irresistibles para muchos. También lo es su capacidad para propiciar la innovación y los negocios, así como la creatividad, la diversidad y la interacción social.

Lo interesante, sin embargo, viene implícito en esta atracción: si cada vez más gente es seducida por estos conceptos de prosperidad y actividad económica, también es menos plausible que su efecto sea positivo para todos. Por eso, a medida que las ciudades se vuelven herederas del mundo, también se vuelven los espacios más propicios para resolver los grandes retos en términos de urbanización y sustentabilidad.

#### MÁS CON MENOS: ¿EL ÉXITO INDISCUTIBLE DE LA CIUDAD?

Es posible que buena parte del análisis de las ciudades como organismos vivos provenga del científico suizo Max Kleiber (1893-1976), quien, en los años treinta, estudió la relación entre el tamaño de los animales y su metabolismo para llegar a un concepto que denominó ritmo metabólico. Lo definió como “la cantidad de energía por unidad de tiempo que necesita un organismo para realizar todas sus funciones”.

A partir del análisis de los ritmos metabólicos de distintos animales, Kleiber encontró que esta proporción no es homogénea y que las especies

más grandes requieren menos energía por kilo que las pequeñas. A esto se le conoce actualmente como la Ley de Kleiber, representada por la curva elefante-hámster.

Kleiber encontró que un hámster, de 150 gramos de peso, puede comer una cantidad de alimentos equivalente a su peso, es decir, 150 gramos de comida, mientras que un elefante, que pesa 50,000 veces más que el roedor, requiere sólo de la cantidad equivalente a su peso (Cook, 2009). Esta relación implica una economía de escala en el consumo de energía: los organismos más grandes consumen menos energía por unidad de tiempo y por unidad de masa.

De alguna forma, la universalidad de esta relación  $3/4$  en el consumo de energía de la mayoría de los organismos, limita la dinámica y la geometría de las redes de distribución dentro de ellos. Así, todas las escalas de la vida se sostienen por redes que crecen en función del tamaño del organismo y que marcan el ritmo de los procesos fisiológicos (Bettencourt y col., 2007).

Pues bien, lo que parecería un análisis exclusivo de la biología para entender el metabolismo de los organismos ha sido retomado para mirar y entender a las ciudades. De hecho, ha sido utilizado por científicos aparentemente alejadas del estudio de las ciudades: los físicos. En 2007, Geoffrey West y Luis Bettencourt, dos físicos del Laboratorio Nacional de los Álamos en Estados Unidos, analizaron decenas de ciudades estadounidenses y varias de las características que las constituyen: su actividad económica, empleo, consumo de energía, demografía, infraestructura, innovación, patrones de comportamiento humano. Al final, encontraron que el asunto de escala identificado por Kleiber en animales también aparece en las ciudades (Bettencourt y col., 2007).

“Este hallazgo implica que ciudades que son superficialmente muy diferentes en forma y ubicación por ejemplo, son de hecho, en promedio, versiones a escala una de la otra”, explican los autores (Bettencourt y col., 2007). Pero así como sucede con los mamíferos, esta ley de escala no es lineal. De acuerdo con los físicos, la ciudad de Nueva York, por ejemplo, tiene el doble de habitantes que la ciudad de Los Ángeles y sin embargo no requiere el doble de infraestructura, sino solamente el 85 % de lo que requeriría la segunda. Quiere decir que las ciudades grandes siguen el patrón de los elefantes, porque finalmente requieren menos.

Sin embargo, hay una diferencia importante: en el caso del elefante, a pesar de que no consume en la misma proporción que el hámster, su metabolismo no cambia ni se vuelve más productivo. De hecho, lo que indica la biología es que los organismos entre más grandes, tienden a tener un meta-

bolismo más lento (caminan, maduran y late su corazón más lentamente).

En las ciudades ocurre lo opuesto. Pareciera que la urbanización rompe con cualquier patrón de la biología. Los físicos encontraron que las ciudades más grandes no se lentifican sino se aceleran pues están asociadas con mayores niveles de productividad. “Los salarios, los ingresos, el crecimiento del producto interno, los depósitos bancarios así como las tasas de invención, medida por nuevas patentes, y el empleo en los sectores creativos siguen una escala de superlinealidad en función del tamaño de la ciudad” (Bettencourt y col., 2007). Cuando la ciudad crece, se vuelve más productiva sin necesidad de tener más infraestructura. En pocas palabras, hacen más con menos.

Hasta aquí, la ciencia diría que la ciudad es un éxito rotundo como modo de asentamiento mundial y que entre más grande sea, consumirá menos recursos y producirá más. Es, probablemente, la regla de oro para la productividad. Significaría que no nos hemos equivocado y que vivir en una ciudad así como promover su crecimiento es la mejor decisión. ¿Lo es?

#### EL LÍMITE DE LA CIUDAD

Los mismos West y Bettencourt apuntan que la productividad también puede tener sus riesgos: “un aumento de las oportunidades sociales productivas, tanto en número como en calidad, lleva a cambios en el comportamiento individual a través de la complejidad de la expresión humana, incluyendo los que tienen consecuencias negativas, tales como costos, los índices de criminalidad, y la incidencia de enfermedades” (Bettencourt y col., 2007). Básicamente, una ciudad grande propicia individuos más complejos y, tristemente, más criminales y más enfermos.

Desde el 2000, un informe del Banco Inter-Americano de Desarrollo ya identificaba la relación entre la criminalidad y el tamaño de las ciudades. Gracias a los datos de un sistema de encuestas conocido como Latinobarómetro, fue posible obtener datos sobre criminalidad en 80 de ellas, ubicadas en 17 países de América Latina. El informe las divide en tres grupos: las ciudades con menos de 100.000 habitantes tienen, en promedio, bajos niveles de criminalidad; las que tienen una población menor de un millón pero mayor de 100.000 habitantes tienen niveles intermedios de criminalidad; y las que están por encima del millón de habitantes tienen altos niveles de criminalidad. Varias fuentes, según el informe, apuntan que esta “asociación positiva entre criminalidad y población ocurre no sólo en el agregado, sino

también, y sin excepción, en cada país de América Latina por separado”<sup>2</sup>

Por otro lado, la relación entre vivir en grandes ciudades y la incidencia de enfermedades también tiene cada vez mayor evidencia, sobre todo las que se refieren al estrés, la ansiedad y otros desórdenes mentales. Pero también con cada vez mayor capacidad y mejor tecnología, la medicina se une a la causa para abordar los procesos neurológicos de esta relación. En 2012, por ejemplo, un grupo de científicos alemanes usaron imágenes por resonancia magnética e identificaron qué partes del cerebro se activan en las personas que habían nacido y crecido en una ciudad ante una situación estresante para compararlas con las de quienes habían nacido y crecido en zonas rurales<sup>3</sup>. El mismo grupo trabajó después con un grupo de geocientíficos para desarrollar una aplicación por medio de la cual los individuos del estudio pudieran reportar cómo se sentían en función de los lugares de la ciudad en los que estaban. “Al correlacionar los datos de la imagen con sus estados de ánimo en diferentes lugares, el equipo espera trazar cómo los diferentes aspectos de la vida de la ciudad afectan el cerebro - si, por ejemplo, pasear por un parque realmente tiene una influencia calmante en la amígdala y la corteza cingulada”<sup>4</sup> El objetivo final es contribuir con una base científica para generar una especie de código de la ciudad y contribuir para mejorar el diseño de las áreas urbanas.

Pero más allá de los riesgos en el comportamiento y la salud individual, lo cierto es que el tamaño de una ciudad puede determinar su propia sobrevivencia o su propio colapso. Ya sabemos que entre más grande una ciudad, requiere menos elementos para producir más. Lo que las vuelve, en teoría, indiscutiblemente exitosas.

Y lo sería, sí, si nos atenemos únicamente a los criterios con los que comúnmente se mide la productividad: factores económicos. El problema es que el éxito de una ciudad no depende únicamente de qué tan productiva -económicamente- es, sino en que lo sea con un enfoque sustentable. Y de nuevo, la biología y la ecología aportan conceptos útiles para llevarlo a cabo.

Unos años después de que Kleiber hiciera sus estudios sobre el ritmo metabólico, en 1965 el científico estadounidense Abel Wolman (1892-1989) desarrolló el concepto del metabolismo aplicado en las ciudades. En bio-

---

<sup>2</sup>“Desarrollo mas allá de la economía: Informe 2000 : progreso económico y social en América Latina” Banco Inter Americano de Desarrollo, 2000. p.p. 219.

<sup>3</sup>Meyer-Lindenberg, A. “City living and urban upbringing affect neural social stress processing in humans”, *Nature* 474, 498–501 (23 June 2011).

<sup>4</sup>Abbott, A. “Stress and the city: Urban decay” *Nature News*, Octubre 2012.

logía, metabolismo (del griego *metabolé*, que significa 'cambio') se refiere a todos los procesos físicos y químicos del cuerpo que convierten o usan energía (Wolman, 1965) que constituyen la base de la vida y, por tanto, permiten al organismo llevar a cabo funciones elementales como la respiración, la circulación sanguínea o la digestión de alimentos.

Wolman afirmaba que esto justo ocurría en las ciudades, pues necesitaba ciertos "requerimientos metabólicos" para mantener a sus habitantes (agua, energía, ropa o materiales para la construcción) pero que este ciclo metabólico no podía estar completo sin tomar en cuenta cómo se disponían los desperdicios y los residuos de esos requerimientos.

El metabolismo urbano, en ese sentido, es "un método para analizar las ciudades a través de la cuantificación de las entradas (agua, comida y combustible, especialmente) y sus respectivas salidas (aguas negras, desechos sólidos y contaminantes del aire) y darle seguimiento a sus transformaciones y flujos". (Holmes y Pincetl, 2012) De hecho, utilizaba estos criterios para contabilizar las posibles salidas de una hipotética ciudad estadounidense de un millón de habitantes y, con ello, hacer visible, y con números, el impacto de los residuos de las necesidades ciudadinas que se volverían inmanejables (Wolman, 1965).

Esto también ha dado pie a pensar en las ciudades no sólo como un organismo sino como un ecosistema, con intercambios de materia y energía entre sus componentes. El problema es que, a diferencia de los flujos de energía de los ecosistemas naturales, en donde una parte de ésta se absorbe y se transforma para ser aprovechada por niveles tróficos superiores, en las ciudades no parece ocurrir lo mismo. Mientras que la energía solar es aprovechada por las plantas, estas son aprovechadas por los consumidores primarios, estos por los secundarios y estos por nutrientes inorgánicos, que aprovecharán de nuevo las plantas, en los ecosistemas urbanos la energía es producto de un primer y único nivel de aprovechamiento de los recursos (en su mayoría, por la quema de combustibles fósiles) que no vuelve a ser aprovechado. Y el proceso se repite con todo aquello que entra en el sistema: el agua limpia se ensucia, los alimentos se consumen y más tarde se vierten en las aguas del subsuelo, y los bienes materiales se usan y se desechan.

Esto quiere decir que el ecosistema urbano no funciona como un ciclo cerrado, es decir, es incapaz de cerrar los flujos de materiales y de energía que trae del exterior. Las ciudades son sistemas abiertos y también crecientes, pues dependen de la disponibilidad de recursos naturales externos que las doten de materia y energía para su consumo diario, y al mismo tiempo, producen residuos difíciles de aprovechar. Se producen ciclos que nunca se



**Figura 2:** humanos que consumen árboles-bosques y defecan edificios-ciudades. Una humorística representación gráfica de aquello que advertía Wolman (Wolman, 1965). La imagen en animación está disponible en [éste enlace](#).

cierran. Es ahí cuando aparece el asunto del límite. Si los recursos que satisfacen los requerimientos metabólicos urbanos se terminan, ¿qué queda? Muy probablemente, su colapso, el fin de la preponderancia de los espacios urbanos tal como Wolman lo predijo en los años sesenta.

#### UNA NUEVA PLANEACIÓN URBANA

Claramente, la forma más realista de evitar que el tamaño de una ciudad la lleve invariablemente al colapso, junto con sus habitantes, es una planeación distinta que incluya la participación de distintas ciencias para su análisis y que tenga como eje primordial el considerar a la ciudad como un organismo vivo, o mejor, como un ecosistema.

De acuerdo con Luis Zambrano, del Laboratorio de Restauración Ecológica del Instituto de Biología de la UNAM<sup>5</sup>, “la gente comúnmente piensa que las ciudades no son ecosistemas, que ya porque tenemos asfalto enci-

<sup>5</sup>Zambrano, L. (2012). Entrevista personal. Laboratorio de Restauración Ecológica del Instituto de Biología de la UNAM. Programa “Ciudad: ¡Viva!” La Ciencia de la Ciudad. SPR. México, 2012.

ma el ecosistema deja de ser y deja de existir. Sin embargo, las ciudades todas son un ecosistema. Ponemos demasiado concreto pero la naturaleza sigue funcionando". La propuesta la ciencia (o las ciencias) no es renunciar a la ciudad como la forma más exitosa de poblar el mundo o de producir más con menos, ni tampoco tratar de impedir la tendencia global de que los países se vuelvan cada vez más urbanos, que es, con mucha probabilidad, totalmente inevitable.

La clave, más bien, está en ampliar la mirada o en incluir muchas otras. La del médico que analiza a las personas para saber qué situaciones de estrés están modificando su cerebro; la del geocientífico que desarrolla software para identificar cómo impacta el espacio urbano a sus habitantes; la del físico que establece modelos para entender cómo y qué cambia en una ciudad en función de su tamaño; la del biólogo capaz de hacer análisis de las ciudades con base en los conceptos y los procesos que describen a los organismos; la del economista que se convence de integrar los criterios de sostenibilidad a la forma en como se mide la productividad de una ciudad; al del ecólogo que, al ver a la ciudad como un ecosistema, puede diseñar formas de recuperar sus procesos naturales sin dañar en la calidad de vida de quienes se encargaron de cubrirlos de asfalto. En la medida en que todas estas miradas confluyan estaremos en mejores posibilidades de propiciar un mejor diseño de espacios urbanos y de evitar el colapso como común denominador de nuestras vertiginosas ciudades.

#### REFERENCIAS

- Bettencourt, Luís MA y col. (2007). "Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities". En: *Proceedings of the national academy of sciences* 104.17, pág. 7301.
- Cook, Jonh (2009). <https://goo.gl/P60HPP>. Online: página consultada el 02/02/2016.
- FAO (2000). <https://goo.gl/C6wp1s>. Online: imagen consultada el 02/02/2017.
- Holmes, T. y S. Pincetl (2012). <https://goo.gl/Qb4GXq>. Urban Metabolism Literature Review. Center for Sustainable Urban Systems. UCLA Institute of the Environment. Online: página consultada el 02/02/2016.
- INEGI (2010). <https://goo.gl/l4HF9>. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México. Online: consultado en 02/02/2017.
- ONU-Habitat (2012). *State of the World's cities 2012/2013*. United Nations Human Settlements Programme, New York.

Wolman, A. (1965). <https://goo.gl/kVIRRV>. The metabolism of cities. *Scientific American* 213(3). Online: consultada el 02/02/2016.