

Los desafíos de la ciudad del siglo XXI



Lucía Álvarez Enríquez
Gian Carlo Delgado Ramos
Alejandra Leal Martínez
(coordinadores)

Prólogo: Senador Luis Sánchez Jiménez

Senado de la República, LXIII Legislatura, Vicepresidencia de la Mesa Directiva
Universidad Nacional Autónoma de México
Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades
Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad
Programa Universitario de Estrategias para la Sustentabilidad

Los desafíos de la ciudad del siglo XXI / Lucía Álvarez Enríquez, Gian Carlo Delgado Ramos, Alejandra Leal Martínez (coordinadores). – Primera edición.
561 páginas. – (Colección alternativas).

ISBN 978-607-02-8025-2

I. Ciudades y pueblos – Crecimiento – Siglo XXI. 2. Urbanización – Aspectos sociales – Siglo XXI. I. Álvarez Enríquez, Lucía, editor. II. Delgado, Gian Carlo, 1978- editor. III. Leal Martínez, Alejandra, editor. IV. Serie.

HT166.D46 2016

LIBRUNAM 1897559

Primera edición, 2016

D.R. © Senado de la República, LXIII Legislatura
Torre de Comisiones
Av. Paseo de la Reforma N° 135
Cuauhtémoc, Tabacalera 06030, Ciudad de México
www.senado.gob.mx

D.R. © Universidad Nacional Autónoma de México

Centro de Investigaciones Interdisciplinarias
en Ciencias y Humanidades
Torre II de Humanidades 4° piso
Circuito Escolar, Ciudad Universitaria
Coyoacán, 04510, Ciudad de México
www.cetich.unam.mx

Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad
Isabel La Católica N° 7, Centro Histórico
Delegación Cuauhtémoc, C.P. 06000
Ciudad de México, México
www.puec.unam.mx

Programa Universitario de Estrategias para la Sustentabilidad
Edificio de Programas Universitarios, Planta Alta
Circuito de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria,
Delegación Coyoacán, C.P. 04510
Ciudad de México, México
www.puma.unam.mx

Cubierta de la edición: Isaac Uribe Dávalos, Daniel López Torres

METABOLISMO Y ENTROPÍA EN LAS CIUDADES: ANÁLISIS Y GESTIÓN PARA LA SUSTENTABILIDAD*

*Cristian Julián Díaz Álvarez***

*Carolina Pulecio León****

INTRODUCCIÓN

Los centros urbanos sufren continuos cambios demográficos, económicos, culturales, políticos, ambientales y de infraestructura durante sus fases de crecimiento y mantenimiento. Dichos cambios se expresan –algunas veces– en el incremento de su *stock* material, consolidación financiera, enriquecimiento cultural, cualificación de la población y afianzamiento de la fe y la religión; pero en otras ocasiones, en la degradación parcial de áreas urbanas, periurbanas, conurbanas y rurales, la destrucción del ambiente natural y construido y la desaparición de todo vestigio de la civilización; tal y como ocurrió en las otroras ciudades-Estados maya en Centroamérica, Rapa Nui en el Pacífico, Angkor en el sudeste de Asia y en los asentamientos vikingos en Groenlandia y Anasazi en América del Norte (Diamond, 2006). Todo ha sido un proceso dinámico y fortuito de intercambio y transformación de materia,

* Agradecemos a los profesores Gian Carlo Delgado, Lucía Álvarez y Alejandra Leal por hacer viable el Seminario Internacional Las Ciudades del Siglo XXI; asimismo, al Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades de la Universidad Nacional Autónoma de México y al Senado de la República de México por subvenir ese magnífico espacio de discusión y reflexión urbana.

** Ingeniero químico, especialista en Manejo Integrado del Medio Ambiente y Magister en Medio Ambiente y Desarrollo. Profesor y actual director del Departamento de Ingeniería Ambiental de la Universidad Central.

*** Ingeniera química, consultora independiente en temas de sostenibilidad ambiental industrial y urbana, y educación ambiental.

energía, información y dinero entre sistemas complejos inmersos en relaciones de poder, jerarquía y autoridad; dependientes de las leyes y principios naturales.

Ejemplos actuales de estos grandes sistemas son las capitales y ciudades emergentes¹ latinoamericanas, que ante la continua presión de una población en aumento sobre su infraestructura, oferta de bienes y servicios, capacidad de carga y resiliencia de sus habitantes, corren el riesgo de exceder los límites permisibles de su propia homeostasis y adaptabilidad, así como afectar las zonas de frontera, los alrededores y reservorios de abasto y provisión. Esta situación exacerba su vulnerabilidad en momentos en que la variabilidad climática, el calentamiento global, las crisis financieras y económicas, el descontento de la población, la violencia y los escenarios de conflicto disminuyen las probabilidades de supervivencia de los sistemas humanos.

Por tal motivo, la vitalidad de la ciudad dependerá cada vez más de sus relaciones ecosistémicas con las áreas aledañas, de la eficiencia y eficacia de los procesos internos de transformación y de las redes de abastecimiento local, regional y global. Razón por la cual, la caracterización y el entendimiento del comportamiento de sus demandas materiales y energéticas, de la presión de sus descargas, así como la cuantificación del nivel de entropía generado, son importantes acciones para ayudar a identificar operaciones críticas que pueden estar frenando el crecimiento económico, socavando el desarrollo, deteriorando el ambiente propio y circundante, y reduciendo la oferta ambiental de los ecosistemas de soporte. Se trata de procesos no deseados que con certeza merman la competitividad de las capitales latinoamericanas en los escenarios domésticos, regionales y global (Díaz, 2014).

Esta propuesta metodológica y conceptual se fundamenta en la teoría general y dinámica de sistemas, en los principios de conservación de la masa y la energía, en la metáfora organicista del metabolismo urbano, en la ecología urbana, y en el análisis crítico de la entropía como expresión del desorden y como determinante de potenciales colapsos o de un nuevo orden. Potencial herramienta de gestión para los hacedores de política, los tomadores de decisión, los académicos y la comunidad en general.

¹ El Banco Interamericano de Desarrollo (BID) las define como aquellas que tienen "un crecimiento poblacional y económico positivo por encima del promedio nacional durante el último periodo intercensal y que tienen una población de entre 100 mil y 2 millones de habitantes" (2015).

UNA HISTORIA RECIENTE

La estrategia de analizar la ciudad desde la lógica de la teoría general de sistemas, atendiendo los principios y leyes naturales, ha permitido concebir ecológicamente las ciudades como superorganismos que requieren y transforman la materia y la energía para crecer y manifestarse, a la vez que liberan desechos líquidos, sólidos y gaseosos (Díaz, 2011; K'Akumu, 2007, p. 222).

Los primeros análisis relacionados con la sostenibilidad ambiental, desde la lógica de la metáfora organicista ciudad-sistema natural-organismo, se fundamentaron en el trabajo de Abel Wolman (1965, p. 179) sobre el metabolismo de las ciudades –*the metabolism of cities*–; modelo gráfico y matemático que logró demostrar la relación que hay entre el consumo de materiales y energía, y la magnitud de los desechos generados por una ciudad. Constructo y propuesta que marcó un hito en la concepción urbana, pero que se diluyó durante más de un cuarto de siglo en las agendas académica y política asociadas con los análisis de sostenibilidad ambiental.

Las transformaciones de la materia y la energía, la estructura, lógica y complejidad de su procesamiento, y las relaciones entre ambiente, sociedad y economía en las ciudades han sido comunes en algunos desarrollos teóricos y prácticos durante los últimos 50 años. Autores como Abel Wolman (1965), Scott Cook (1971), Girardet (1992), Newman (1999), Hermantwicz y Asano (1999), Haberl (2001), Christopher Kennedy *et al.* (2009), Owiti K'Akumu (2007), Bruner (2007), Victor Toledo (2008), Idrus *et al.* (2008), Levine *et al.* (2008), Zhang *et al.* (2009), Regolini y Junyent (2009), Díaz (2014) y Delgado (2012), entre otros, evidencian la necesidad de efectuar estudios encaminados a comprender el cumplimiento de los principios de conservación de la materia y la energía y, en algunos casos, reiteran la certeza de la segunda ley de la termodinámica en el contexto económico y social, dimensionando así las implicaciones ambientales del desarrollo (Figura 1).

Por su parte, desde la economía se han desarrollado suficientes estudios urbanos relacionados con el crecimiento económico, la producción, la infraestructura, la dinámica poblacional y el comportamiento de los diferentes sectores de la economía. Sin embargo, muy pocos alcanzan el desarrollo metodológico de Jay Forrester (1999, p. 18), quien modeló la ciudad –desde la teoría general de sistemas y la cuantificación de los flujos de materia e información– como un sistema vivo con funciones de regulación con el ambiente circundante.

Asimismo, las nuevas propuestas conceptuales que surgen desde la economía ecológica son terreno fértil para fomentar el análisis metabólico como una forma de circunscribir los modelos económicos a las leyes naturales, e integrar y analizar

Figura 1. Concepción del metabolismo urbano



Fuente: Elaboración propia.

sistémicamente las distintas matrices ambientales (aire, agua, suelo y biota) para mejorar la comprensión de los sistemas y constructos humanos (Ramos, 2003).

EN EL FILO DE LA OPORTUNIDAD

La inexorable convergencia de la actividad humana en los centros urbanos determina una función de cambio en las dinámicas sociales, políticas, económicas, culturales y ambientales en su interior y en los sistemas aledaños y de soporte (UN-Habitat, 2011, p. 4). Esta tendencia, que se agudizará para el año 2030 (UNDESA, 2008), es vista por algunos como un problema que exacerbará la pobreza, el crecimiento de los cinturones de miseria y el surgimiento y la consolidación de diversos problemas ambientales (Díaz, 2012a; Díaz y León, 2012; Sánchez-Rodríguez, 2008, p. 151); mientras que otros la consideran como una transformación positiva que coadyuvará al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo del Milenio y al crecimiento económico (Martine *et al.*, 2008, p. 2; Tacoli *et al.*, 2008, p. 47). Lógica que se convierte muchas veces en un espejismo para sus habitantes (Cuadro 1).

Proptamente, las áreas urbanas en los países en desarrollo y economías emergentes –y su respectiva población– muestran tasas de crecimiento superiores a sus congéneres establecidas en las principales economías (Martine *et al.*, 2008, p. 2). Esta tendencia, aunada a las dificultades locales y regionales de infraestructura, financieras y educativas, entre otras, establece brechas sociales, exclusión, inequidad

Cuadro 1. El espejismo del crecimiento

Ante el paradigma de la necesidad del crecimiento como vía para el progreso continuo en el mundo rico y como salida de la pobreza para los países en desarrollo (Yusuf *et al.*, 2009, p. 75), la población y el capital se han convertido en "maquinarias de crecimiento" (Meadows, 1992, p. 51) que empujan exponencialmente la producción de alimentos, la utilización de recursos, los requerimientos energéticos e, indudablemente, la contaminación. Fuerzas de difícil control, rápida acción y cambio que fácilmente podrían superar los límites ambientales del sistema urbano y los alrededores, generando como riesgo probable la declinación o descenso súbito, incontrolable e impremeditado de la producción, de la capacidad industrial, de la población humana y/o de la complejidad política, económica y social. Conflictos que han sido estudiados y advertidos en varias épocas y por varios actores: Malthus (1798), Meadows (1994) y Diamond (2006), entre otros.

"La dificultad de la subsistencia en la naturaleza ejerce sobre la fuerza de crecimiento de la población una fuerte y constante presión restrictiva [...] que se manifestará cruelmente entre los hombres como miseria y vicio" (Malthus, 1798, p. 54).

"La utilización humana de muchos recursos esenciales y la generación de muchos tipos de contaminantes han sobrepasado ya las tasas físicamente sostenibles y que sin reducciones significativas en los flujos de materia y energía habría una incontrolada disminución per cápita de la producción de alimentos, el uso energético y la producción industrial" (Meadows *et al.*, 1992, p. 23).

"A veces, las especulaciones malthusianas más siniestras se hacen realidad" (Diamond, 2006).

Desafortunadamente, estas advertencias no se han tomado en cuenta en los planes de ciudad para alcanzar una economía sana que asegure el bienestar de la población; es más, el crecimiento económico es, en palabras de Sha Zukang (UN, 2009, p. 5), "una necesidad apremiante para lograr los Objetivos de Desarrollo del Milenio". Afirmación que promulga el mejoramiento del tamaño, la eficacia y calidad de la fuerza de trabajo, el pleno empleo, la estabilidad de los precios, la distribución conveniente de los recursos económicos, la distribución satisfactoria del ingreso, la acumulación de capital, la salvaguarda de los recursos naturales, el avance en la ciencia, la tecnología y la innovación, y el aseguramiento de un clima político y económico claro (Guthrie, 1963, p. 15); algunos de los cuales son inmiscibles por naturaleza. Por tal motivo, en muchas ciudades latinoamericanas este "crecimiento económico" se transforma en "crecimiento no económico" (Daly, 2001, p. 157), ya que la población sigue creciendo exponencialmente, la redistribución es inexistente, la lucha contra el desempleo se mantiene en franca retirada y los sistemas naturales de soporte se degradan día a día.

Continúa...

Cuadro 1. El espejismo del crecimiento

Ante esta desconcertante situación, la ciudad puede adaptar nuevos esquemas para evitar escenarios de insostenibilidad, a saber: a) optar por un desarrollo sostenible o un desarrollo humano, b) encontrar el equilibrio entre la triada crecimiento, ambiente y desarrollo, c) considerar un crecimiento cero o d) contemplar un decrecimiento económico. Por desgracia, todo el concepto de bienestar en función del crecimiento está construido sobre una ilusión, debido a que "las necesidades individuales no se sacian cuando el ingreso se incrementa, y los individuos no se muestran más dispuestos a transferir parte de sus recursos a los pobres cuando se tornan más ricos" (Thurow, 1981, p. 22). Inercia cultural que convirtió la desigualdad como una lamentable necesidad en el camino al mayor crecimiento; situación evidente en muchas ciudades latinoamericanas.

Fuente: Elaboración propia con información de Díaz (2012b).

y disparidad de oportunidades; asimismo, conlleva un deterioro ambiental tanto al interior del sistema urbano como en los asentamientos del conurbano y en las zonas adyacentes de soporte (Curtit, 2003; Díaz, 2011, p. 102; Sánchez-Rodríguez, 2008, p. 151).

En relación con el equilibrio anhelado entre la ciudad y los sistemas naturales de abasto, provisión y amortiguamiento, la expresión de la vida urbana se traduce en una gran variedad de problemas en los distintos compartimentos ambientales (agua, aire, suelo y biota), así como en el incremento de la probabilidad de ocurrencia de eventos no deseados asociados con fenómenos naturales y antrópicos (Díaz, 2011, p. 29). Funciones de mantenimiento que al alterarse diariamente por la "rápida producción del territorio urbanizado" (Curtit, 2003, p. 17) definen nuevos límites, áreas de estudio y cambios en los flujos de materia, energía e información que modifican –en estructura y valor– la forma en cómo el sistema se comporta consigo mismo, con el conurbano, con las áreas rurales y los ecosistemas estratégicos.

Esta forma de relación interna y con el entorno ignora la infalibilidad de los principios y las leyes naturales, comportamiento insostenible que conllevará –en primera instancia– un colapso de orden ambiental que a su vez generará cambios en los órdenes social, político y económico; alteración del estado termodinámico de la ciudad que se verificará en una variación y un aumento en el nivel de entropía.

Figura 2. Principales problemas en los distintos compartimentos ambientales de una ciudad



Fuente: Elaboración propia.

EL GRADO DE DESORDEN URBANO

Todo habitante y visitante ocasional o recurrente de una urbe, metrópoli o área metropolitana siente y sufre –en alguna medida– la generación y acumulación de entropía en el sistema, la cual se expresa, desde el punto de vista ambiental, como pérdida de la calidad del aire, la contaminación de los cuerpos de agua, la degradación y desertización de suelos, la liberación, bioacumulación y biomagnificación de compuestos orgánicos persistentes y metales pesados, la pérdida de biodiversidad y el incremento en el volumen de basura, por citar los más importantes. Condición de estado que también se refleja en el deterioro de la infraestructura urbana, la congestión, el sobrepaso de los servicios de movilidad, la degradación e ineficacia de los servicios de salud y educación, y el aumento de la inseguridad, entre otros.

Esta realidad urbana obedece a la certeza de las leyes naturales, proptamente de la termodinámica (estudio de la energía y su relación con las transformaciones de la materia), la cual se fundamenta en cuatro principios que, enunciados en términos del estudio de las ciudades (Tabla 1), son: a) *Ley Cero*: si dos sistemas [urbanos]

Tabla 1. Definición y aplicación de los principios termodinámicos en las ciudades

Principio termodinámico	Interpretación urbana	Ejemplo
<i>Ley Cero:</i> Si dos sistemas están en equilibrio con un tercero, entonces deben estar en equilibrio entre ellos.	<i>Ley Cero:</i> Si dos urbes están en equilibrio con una tercera, entonces todas deben estar en equilibrio.	Homogenización del paisaje urbano regional y/o global. Búsqueda de cobertura total de servicios dentro de la ciudad y los alrededores.
<i>Primera Ley:</i> En un proceso cíclico, el calor neto liberado es proporcional al trabajo neto realizado.	<i>Primera Ley:</i> En los procesos urbanos, el calor neto liberado es proporcional al trabajo neto realizado para su mantenimiento y crecimiento.	Fenómeno de isla de calor (concentración de altas temperaturas en el casco urbano en comparación con la periferia).
<i>Segunda Ley:</i> Es imposible construir un dispositivo que opere en un ciclo y no produzca ningún otro efecto que la transferencia de calor de un cuerpo a baja temperatura a otro de alta temperatura.	<i>Segunda Ley:</i> Es imposible construir una ciudad cuya dinámica específica no produzca ningún otro efecto que la transferencia de calor entre zonas que se encuentren con distintas temperaturas.	El consumo energético urbano para la movilidad no logra eficiencias cercanas al 40%; razón por la cual parte de la energía se pierde en forma de ruido y calor; asimismo, en formas de materia no aprovechables como los gases de combustión.
<i>Tercera Ley:</i> La entropía de una sustancia pura en equilibrio termodinámico tiende a cero cuando la temperatura de la sustancia pura se acerca al cero absoluto.	<i>Tercera Ley:</i> La entropía de una ciudad podrá alcanzar un valor nulo cuando su temperatura se acerque al cero absoluto.	En época de invierno las ciudades tienden a expresar menos desorden que en época de verano. Igualmente, urbes ubicadas en pisos térmicos altos tienden a ser más ordenadas.

Fuente: Elaboración propia.

están en equilibrio con un tercero, entonces deben estar en equilibrio entre ellos, b) *Primera Ley:* en un proceso cíclico [urbano], el calor neto liberado es proporcional al trabajo neto realizado, c) *Segunda ley:* es imposible construir un[a] [ciudad] dispositivo que opere [de una manera específica] en un ciclo y no produzca ningún otro efecto que la transferencia de calor de un [lugar] cuerpo a baja temperatura a otro de alta temperatura, d) *Tercera Ley:* la entropía de una [ciudad] sustancia pura en equilibrio termodinámico tiende a cero cuando la temperatura de la [ciudad]

sustancia pura se acerca al cero absoluto (Cengel y Boles, 1994; Keena y Shapiro, 1947; Russell y Adebisi, 1993).

En el escenario urbano, los *Principios Cero y Primero* explican que toda forma de energía (eléctrica, radiación solar, química asociada a los combustibles y alimentos) que fluya, se utilice o transforme en la ciudad determinará que la zonas del conurbano, áreas rurales y ecosistemas estratégicos tiendan a alcanzar un equilibrio energético con el polo de mayor consumo; hecho que se verifica –de la manera más simple– con una distribución de temperatura en el espacio-tiempo; tendencia relacionada con el fenómeno de isla de calor.²

Este aumento de temperatura en la ciudad se atribuye al comportamiento *energívoro* para mantener operaciones asociadas con el transporte de personas, materiales e insumos, la transformación de formas de materia, energía e información, la construcción de obras civiles, la prestación de servicios para el divertimento, la gestión de cualquier tipo de residuo, etcétera. Situación contraria a las condiciones de frontera (límite urbano) y los alrededores, en donde la temperatura es menor debido al dominio de paisajes poco intervenidos y al menor consumo per cápita.

Es importante mencionar que este fenómeno también se debe al rigor y la certeza de la segunda ley de la termodinámica, puesto que no es posible aprovechar en su totalidad la energía que fluye hacia, dentro y desde la ciudad, ya que ésta expresa una propiedad y función de estado llamada entropía (S); la cual depende de la materia y se define por la sumatoria de todos los subsistemas urbanos existentes. Es decir, a mayor flujo y acumulación de materiales en la ciudad, se generará un mayor desorden, el cual se verifica ambientalmente como vertimientos, emisiones, residuos sólidos, ruido, residuos peligrosos, deterioro de suelos, pérdida de biodiversidad, entre otros. Pero también, en problemas cotidianos de los ciudadanos, como los embotellamientos de tráfico, la pérdida o intermitencia en el suministro de algún servicio público, el deterioro de la infraestructura urbana y la reducción en la calidad de servicios de salud, por mencionar los más apremiantes.

A manera de conclusión preliminar, se puede decir que el crecimiento urbano, la conurbación y la consolidación de áreas y zonas metropolitanas generarán inevitablemente un mayor nivel de entropía que incrementará el deterioro ambiental, acrecentará el desorden en las redes de flujo y medrará la calidad de vida de sus habitantes.

² Las islas de calor o islas térmicas urbanas se refieren al gradiente térmico que se observa entre los espacios urbanos densamente ocupados y construidos y la periferia rural o peri-urbana (EPA, 2009).

¿QUÉ HACER CON LA ENTROPÍA?

El caos es una propiedad inherente a la ciudad. No obstante, el reto de gestionar el continuo incremento de entropía no ha sido considerado en los planes de mejoramiento, planeación y política urbana.

Históricamente, las ciudades han tratado de relocalizar las expresiones de desorden que las aquejan, tomando acciones como: *a)* conducir las aguas servidas y demás vertimientos por sistemas de alcantarillado, para después entregarlas a cuerpos de agua receptores; *b)* recoger y conducir los residuos sólidos a zonas próximas al casco urbano para su disposición final, y *c)* liberar al aire los gases contaminantes esperando que éstos se diluyan; entre las más comunes. Hoy día, dichas prácticas se mantienen con la variación de incluir sistemas de tratamiento para mitigar el impacto ambiental y, en menos ocasiones, modificando los procesos generadores del problema para prevenir parcialmente la contaminación.

En resumen, estas actividades se concentran en transferir el problema a otro territorio, reubicar el contaminante, cambiar su fase/estado (llevándolo de sólido a líquido, por ejemplo) o deshaciéndose rápidamente del material, la especie química o la forma de energía; lo que en términos de la economía ambiental se considera como una "externalidad negativa".³ Simplemente, la ciudad acumula contaminantes o los relocaliza en sus alrededores, transfiriéndole el problema a otros sin consulta previa.

Un aspecto adicional en la crisis ambiental de la ciudad corresponde a las acciones de prevención y control de la contaminación. Toda la técnica, tecnología, recursos financieros, materiales, energía y talento humano que se destinan para mejorar el desempeño ambiental urbano sucumben ante la certeza e infalibilidad de la entropía, ya que "por cada estructura ordenada que producimos en nuestro mundo, se generará también una cantidad aún mayor de desorden" (Brown, Lemay y Bursten, 1991, p. 753).

Esta paradoja termodinámica –que rige todo constructo de origen antrópico– genera el siguiente contraste urbano: unas muy pocas localidades, barrios o zonas alcanzan una gran cualificación urbanística y calidad ambiental; mientras que las áreas restantes –la mayor parte– terminarían afectadas y degradadas al ser

³ Una *externalidad negativa* se define como un efecto externo –producto de la rigidez del mercado– que sufre una o varias personas por acciones u omisiones de otras, y que no se refleja en los precios; lo que implica que los beneficios o costos directos de una actividad no reflejan todos los costos totales generados por dicha actividad (Delacámara, 2008).

receptoras de las externalidades negativas. Asimismo, se presentarán tensiones y desequilibrios con el conurbano, que tendrá que coexistir con áreas deterioradas, zonas de disposición final de residuos y urbanización forzada e ilegal en terrenos de alto riesgo.

En mérito de lo anterior, se podría decir que el crecimiento urbano y su intento de cualificación exigirán el sacrificio de áreas internas, zonas rurales o ecosistemas estratégicos; el cual debería ser dimensionado y declarado por los gestores urbanos, compensado a los damnificados y comunicado a los beneficiarios.

A diferencia de las ciudades y demás artificios humanos, los sistemas naturales logran reducir el nivel de entropía a medida que se asciende en la cadena trófica, al transformar el desorden en información útil (Margalef, 2002). Condición envidiable que nunca lograrán las urbes, lo que exige hallar alternativas para viabilizar el control del caos o reducir su magnitud, reconociendo –naturalmente– la validez de la tercera ley de la termodinámica, que declara la inevitabilidad de reducir el desorden de un sistema a no ser que se reduzca la temperatura en su interior y alrededores.

Es decir, la entropía alcanzará un valor cero si y sólo si la temperatura alcanza el cero absoluto (-273°C). Estado restrictivo imposible de sortear, puesto que no existe proceso alguno capaz de llegar a dicho límite inferior en un número finito de pasos (Abbot y VanNess, 1969). En síntesis, la ciudad tendrá que coexistir con su propiedad genética de generar desorden, a no ser que muera, colapsando totalmente;⁴ lo que la convierte en una estructura disipativa que sólo puede existir en conjunción con el conurbano, la frontera agrícola y las demás zonas de abasto (Prigogine, 2008).

PROPUESTAS PARA LA SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL URBANA

Las proposiciones que se derivan de esta breve disertación se fundamentan en dos consideraciones claras: *i)* la comprensión y aplicación del metabolismo urbano, mediante el conocimiento, el manejo y la conservación de los flujos de materia, energía e información; y *ii)* la gestión y coexistencia de la entropía, para reducir –al máximo– el nivel de desorden y minimizar las externalidades negativas en su interior y alrededores.

⁴ La entropía absoluta es cero para todas las sustancias cristalinas perfectas a la temperatura del cero absoluto (Smith, Van Ness y Abbot, 1996).

Sistematización de la información urbana

La gestión ambiental urbana deberá contar con un sistema de información que integre y relacione los distintos compartimentos ambientales, exponiendo así la visión sistémica existente entre el aire, el suelo, el agua y la biota. De esta manera se reconocerá que los contaminantes mantienen una estructura y magnitud asociada con sus respectivos ciclos biogeoquímicos –se movilizan, cambian de fase y reaccionan–. Asimismo, se recomienda brindarle a dicho sistema una capacidad de cruzar la información ambiental (indicadores e índices) con variables sociales, económicas, naturales y políticas; alcanzando un escenario ideal al trabajar en línea –accesible desde cualquier dispositivo móvil– y alimentado con información en tiempo real.

Metabolismo cíclico urbano

La mejor acción biomimética que puede adoptar una ciudad es la configuración de flujos circulares de materia y energía, mediante la apropiación de operaciones y procesos de reutilización, reciclaje y reducción, principalmente, del agua. No es lógico que este vital líquido fluya desde un reservorio hasta las ciudades para ser linealmente utilizado, degradado y vertido a un cuerpo receptor (río, lago/laguna, humedal o mar), puesto que se derrocha un recurso estratégico para la supervivencia y el desarrollo de un país (Díaz *et al.*, 2015; López, 2005). Se propone, por tanto, su reinyección –con su respectivo tratamiento para satisfacer necesidades ecológicas, paisajísticas, comerciales, industriales y, en casos extremos, domésticas.⁵

Reducir el consumo urbano global y per cápita

Ante el amenazador escenario de reducción y distribución desigual del ingreso en la unidad familiar, se convierte en opción viable para las personas dejar la vana

⁵ Considerar el uso de agua residual para satisfacer las necesidades de consumo humano no es una propuesta descabellada. Esto ocurre diariamente en ciudades como Las Vegas –Condado de Clark– Nevada, gracias a tres grandes instalaciones depuradoras, a saber: Water Pollution Control Facility, Bonanza Mojave Water Resource Center y Durango Hills Water Resource Center (City of Las Vegas, 2015; Whitaker, 2014).

percepción de que un consumo ostentoso define el prestigio social, volviendo más bien a las altas virtudes cívicas de la frugalidad. En estos momentos en que la zozobra financiera ronda continuamente, es importante recordar los hechos de los Apóstoles (I Timoteo 6, 7 - 9):

[...] En verdad nada hemos traído a este mundo, ni cosa alguna podremos llevarnos de él. Tentando con qué alimentarnos y vestirnos sintámonos con ello contentos. Pues los que quieren enriquecerse caen en la tentación, en lazo y en muchas codicias insensatas y perdición.

Una alternativa clásica de la economía para reducir el consumo es promover el ahorro mediante el aumento de la tasa de acumulación de capital (Guthrie, 1963, p. 272). Por lo tanto, su aumento –como condición para favorecer el crecimiento económico– se podría lograr incrementando la magnitud y la categoría del ingreso per cápita, esperando así que la propensión media a consumir decrezca, tal como lo propone Sirkín (1962, p. 89). Es por esta razón que las personas naturales, los hogares y las personas jurídicas deberían restringir su consumo, no sólo para reducir su huella ecológica sino para aumentar sus existencias de bienes de capital.⁶

Desafortunadamente, esto no es viable ante situaciones de pobreza, pérdida significativa de empleos y del poder adquisitivo del trabajo, puesto que se restringe la capacidad de ahorro debido a que todo el ingreso se concentra en suplir los elementos esenciales a la subsistencia (McNamara, 1973, p. 10). Estos flagelos, junto con las recurrentes crisis económicas, ponen en peligro la capacidad de las capitales latinoamericanas para movilizar recursos internos para el desarrollo (UN, 2009, p. 4). Ante lo cual, lo realmente prioritario es evitar la generación de extremos de abundancia, escasez y desigualdades tóxicas, como las relacionadas con las oportunidades⁷ (Paes de Barros *et al.*, 2008).

Paradójicamente, el ingreso distribuido no podrá garantizar el bienestar debido a la continua y creciente insatisfacción de las necesidades de los individuos. Por tal motivo, se reitera que la felicidad no debe concentrarse en el capital sino en la

⁶ Desde activos líquidos como el dinero en efectivo y las cuentas de ahorro, hasta activos menos disponibles como los bienes raíces.

⁷ La distribución igualitaria de las oportunidades entre los diferentes miembros de la sociedad ha sido una de las bases de los ODM. Sin embargo, ésta no puede asegurar idénticos ingresos individuales, puesto que la escala de distribución del ingreso debe reflejar las diferencias de iniciativa, esfuerzo, productividad, destreza y habilidad individual, y por supuesto, de los costos del trabajo (Sen, 1999, p. 15).

sana estancia en este planeta, porque "todo es vana ilusión... una generación se va y la otra viene, y la tierra siempre permanece" (Qohélet, 1,1-2).

Regularización del abasto y la distribución colectiva con el conurbano

El hecho de concebir los recursos naturales como factor de crecimiento (Castiblanco, 2008, p. 14; Freeman, 1993; Smith, 1979, p. 115) ha precipitado y exacerbado su explotación, transformación y uso, favoreciendo prácticas que casi siempre desconocen las leyes naturales, los ritmos de recuperación y reproducción de las poblaciones, los equilibrios biológicos y la capacidad de carga de ambientes que brindan servicios ecosistémicos. Asimismo, ha llevado el agotamiento físico de las reservas conocidas de los recursos no renovables y la pérdida de calidad de los renovables.

Por estos motivos, se requiere urgentemente un nuevo modelo de aprovechamiento concertado con las personas que habitan las zonas productoras y proveedoras, el cual deberá definir la pauta óptima de extracción para los recursos no renovables y la operación por debajo del máximo rendimiento sostenible –MRS–⁸, en cuanto a los recursos naturales renovables se refiere (Gómez, 2002, p. 12). De esta manera se podrán mantener reservas disponibles para el futuro y asegurar la calidad de los ecosistemas que los sostienen y crean.

Por su parte, la relación existente entre la ciudad y su área de influencia próxima evidencia una alta y riesgosa dependencia de los municipios periféricos, razón por la cual sería pertinente la adecuada coordinación entre los gobiernos para que las posibilidades de suministro confiable de agua, alimentos y formas de energía atiendan las respectivas dinámicas del polo de consumo, de los alrededores y los productores primarios. Asimismo, es imperativo que se inicien proyectos de descentralización del abastecimiento –individual o bajo asociación de municipios– que reduzcan la vulnerabilidad de los habitantes del conurbano.

Proptamente, la prospectiva de abasto de recursos deberá considerar la reducción potencial de la oferta en las zonas productoras, debido a los cambios en el uso de la tierra, en la cobertura vegetal y a la variabilidad y al cambio climático; razón por la cual el gobierno urbano –para la supervivencia– deberá reconocer que las

⁸ Para Gómez (2008, p. 12), la pauta óptima de extracción es aquella "en la que a medida que el precio crezca, la cantidad demandada disminuya gradualmente, y con ella la cantidad de material que se extrae del suelo".

ciudades hacen parte de un sistema regional con un metabolismo social definido por la urbanización acelerada, la industrialización en áreas conurbanas y una agricultura intensiva en consumo de agua y energía, para lo cual es imperativo atender las siguientes recomendaciones: *i)* el uso y ahorro eficiente de los recursos naturales deberá hacerse de manera coordinada con los municipios que están dentro de las zonas metropolitanas; *ii)* es menester alcanzar un metabolismo urbano circular de bajo consumo y baja entropía, en el cual se consolide un modelo efectivo para el reciclaje de materiales; y *iii)* es conveniente considerar el agua como base natural para la definición de políticas de ordenamiento en las áreas metropolitanas.

CONCLUSIONES

Las ciudades latinoamericanas pueden ser concebidas y analizadas como ecosistemas complejos conformados por elementos bióticos y abióticos, tanto naturales como de origen antrópico. Este concepto no es un simple tropo entre naturaleza y urbe para analizar los procesos termodinámicos táctos entre ellos, ya que los sistemas cultural, económico y social determinan propiedades emergentes que definen nuevas formas de expresión entre sus habitantes y el entorno.

La concepción de la ciudad como organismo determina la consideración del real y completo ciclo de la vida, ya que una urbe no puede crecer indefinidamente sin que se presenten deterioros localizados en su interior y alrededores. Asimismo, pueden llegar al término de su existencia luego de un colapso inducido por un trastorno ecológico deliberado o impremeditado y una pésima gestión. Por lo tanto, la posibilidad de muerte urbana determina una contradicción con el concepto tradicional de la sostenibilidad, ya que la existencia de un sistema nunca se podrá mantener indefinidamente en un solo y único estado de equilibrio. Sólo los gestores de política, de la técnica y la tecnología podrán tener como meta brindar las condiciones para que el desarrollo urbano se logre dentro de los límites de los sistemas naturales.

El proyecto de una ciudad para el siglo xxi, cuyos habitantes obren con base en principios éticos y morales por encima de lo material, más que una propuesta optimista irrealizable en estos momentos, es un imperativo categórico para evitar un trastorno ecológico que induzca el término de su existencia luego de un colapso. Terrible hecho que otras ciudades en el pasado sufrieron.

La consolidación de áreas metropolitanas y el crecimiento de ciudades emergentes en América Latina han determinado un aumento en la prestación de bienes y

servicios ambientales para atender las necesidades de una población en aumento. Por tal motivo, el complejo contexto de la provisión de agua, materiales y energía para la ciudad debe considerar, en un futuro cercano, la protección a ultranza de la zonas de abasto, la habilitación de nuevas fuentes de provisión en áreas que son jurisdicción de otros municipios, el diseño de estrategias de adaptación al cambio climático y el reciclaje para satisfacer las demandas de los sectores doméstico, comercial, industrial o agrícola.

La alta dependencia termodinámica urbana con sus alrededores, la enorme presión a la que se encuentran sometidas las zonas de abasto y provisión, su vulnerabilidad ante la variabilidad climática y su insuficiencia para satisfacer las necesidades del siglo XXI ante el potencial aumento en la demanda, son realidades que actualmente determinan límites para el crecimiento. Hacer caso omiso de estas señales es correr un enorme riesgo, para el cual no hay garantías de que las actuales funciones sociales continúen en el futuro, ya que en estos momentos se han alcanzado y consolidado escenarios no deseados para muchos de los que habitamos las ciudades.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbott, M. y Van Ness, H. (1969). *Teoría y problemas de termodinámica*. Cali, Colombia: MacGraw-Hill.
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID) [2015]. *Iniciativa de Ciudades Emergentes y Sostenibles*. En <http://www.iadb.org/en/topics/emerging-and-sustainable-cities>
- Brown, T., LeMay, E. y Bursten, B. (1991). *Chemistry: The central science*. Nueva York: Prentice Hall Inc.
- Brunner, P. (2007). "Reshaping urban metabolism", *Journal of Industrial Ecology*, 11, (2). Massachusetts: MIT Press Journals.
- Castiblanco, C. (2008). *Manual de valoración económica del medio ambiente*. Serie IDEAS, (13), Bogotá, Colombia: IDEA, Universidad Nacional de Colombia.
- Cengel, Y. y Boles, M. (1994). *Thermodynamics*. Nueva York: McGraw-Hill.
- City of Las Vegas (2015). *Wastewater treatment*. En <http://old.lasvegasnevada.gov/Information/5397.htm>
- Cook, S. (1971). "The flow of energy in an industrial society", *Scientific American*, 224 (3), 135-144, Nueva York: Scientific American Inc.

- Curtit, G. (2003). *Ciudad, gestión local y nuevos desafíos ambientales: Reflexiones en torno a las políticas neoliberales y sus efectos sobre nuestros territorios*. Buenos Aires: Centro de Investigaciones Ambientales, Espacio Editorial.
- Daly, H. (2001). "Beyond growth: Avoiding uneconomic growth". En *Sustainability of long term growth: Socioeconomic and ecological perspectives*. Glos, Reino Unido: Edward Elgar Publishing Limited.
- Delacámara, G. (2012). "Análisis económico de externalidades ambientales: Guía para decisores", *Documentos de proyectos*, (200). Santiago de Chile: German Agency for Technical Cooperation-UN, Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- Delgado, G. (2012). "Metabolismo urbano y transporte". En *Transporte, ciudad y cambio climático*. México: Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Diamond, J. (2006). *Colapso: Por qué unas sociedades perduran y otras desaparecen*, Bogotá, Colombia: Random House Mondadori Ltda.
- Díaz, C. (2011). *Metabolismo de la ciudad de Bogotá, D. C.: Una herramienta para el análisis de la sostenibilidad ambiental urbana*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Díaz, C. (2012a). "La ciudad, entre el espejismo del crecimiento y la utopía del metabolismo sostenible", *Degrowth in the Americas*, Montreal, Canadá: Concordia University.
- Díaz, C. (2012b). "Bogotá, D. C.: Entre el espejismo del crecimiento y la utopía del metabolismo sostenible", *Cuadernos de Utopía Colombia*, (2), Bogotá, Colombia: Universidad Central.
- Díaz, C. y León, N. (2012). "Bogotá, D. C.: Indicadores de insostenibilidad ambiental", *Memorias del Congreso Latinoamericano de Ecología Urbana*, Buenos Aires: Universidad Nacional de General Sarmiento.
- Díaz, C. (2014). *Metabolismo urbano: Herramienta para la sustentabilidad de las ciudades*, *Interdisciplina*, 2(2), enero-abril, México: Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Díaz, C., Marín R. y Silva, J. (2015). "Metabolismo hídrico de Bogotá: El gran reto urbano de la gestión del agua". En *La pobreza del agua, soluciones en momentos de crisis*. Bogotá, Colombia: Universidad Central.
- Environmental Protection Agency (EPA) (2009). *Urban heat island basics, reducing urban heat islands: Compendium of strategies*. Environmental Protection Agency, U.S. En <http://www.epa.gov/hiri/resources/compendium.htm>

- Freeman, A. (1993). *The measurement of environmental y resources value: Theory and methods*. Washington: Resources for the Future.
- Girardet, H. (1992). *The Ghata atlas of cities: New directions for sustainable urban living*. Nueva York: Anchor Books.
- Gómez C. (2002). "Crecimiento económico y desarrollo sostenible". En J. C. Jiménez (ed.), *Economía y territorio* (pp. 19-44). España: Civitas.
- Guthrie, J. (1963). *Economía*. Traducción por Manuel de J. Fernández. México: UTEHA.
- Haberl H. (2001). "The energetic metabolism of societies. Part 1: Accounting concepts", *Journal of Industrial Ecology*, 5(1), Massachusetts: Wiley InterScience.
- Hermanowicz, S. y Asano, T. (1999). "Abel Wolman's 'The Metabolism of Cities' revisited: A case of study for water recycling and reuse", *Water Scientific Technology*, 40(45), Londres: Elsevier Science Ltda.
- Idrus, S., Hadi, A., Harman, A. y Mohamed, M. (2008). *Spatial urban metabolism for livable city. Blue prints for sustainable infrastructure conference*. Auckland, Nueva Zelanda.
- K'akumu, O. (2007). "Sustain no city: An ecological conceptualization of urban development", *City*, 11 (2), 223-230, Taylor & Francis Group.
- Keena, J. y Shapiro, A. (1947). "History and exposition of the Laws of Thermodynamics", *Mechanical Engineering*, 69, 915-921.
- Kennedy, C. (2009). "Urban metabolism. Green view", *The Economist*, Londres: Global Agenda.
- Levine, R., Hughes, M., Mather, C. y Yanarella, E. (2008). "Generating sustainable towns from Chinese villages: A system modelling approach", *Journal of Environmental Management*, (87), Elsevier.
- López, M. (2005). "La administración del agua en México", *Memorias del IV Foro Nacional del Agua*, Bogotá, Colombia: Universidad Central.
- Malthus, T. (1798). *An essay on the principle of population, as it affects the future improvement of society, with remarks on the speculations of Mr. Godwin, M. Condorcet, and other writers*. Londres: J. Johnson, in St Paul's Church-yard.
- Martine, G., McGranahan, G., Montgomery, M. y Fernández-Castilla, R. (2008). *The new global frontier: Urbanization, poverty and environment in the 21st century*. Londres: Earthscan.
- Margalef, R. (2002). *Teoría de los sistemas ecológicos*. Barcelona: Alfaomega Grupo Editor.
- McNamara, R. (1973). *Address to the board of governors*. Speech presented at the annual meeting of the World Bank in Nairobi, Kenya, September 4, report 42031, World Bank.

- Meadows, D., Meadows, D. y Randers, J. (1994). *Más allá de los límites del crecimiento*. Madrid: El País Aguilar.
- Newman, P. (1999). "Sustainability and cities: Extending the metabolism model", *Landscape and Urban Planning*, (44), Estocolmo, Suecia: Elsevier.
- Paes de Barros, R., Ferreira, F., Molinas, J. y Saavedra, J. (2008). *Mitigando la desigualdad en América Latina y el Caribe*. Bogotá, Colombia: Banco Mundial, Mayol Ediciones.
- Prigogine, I. (2008). *Las leyes del caos*. Traducción castellana de Juan Vivanco; revisión de Javier García Sanz. Barcelona: Crítica.
- Ramos, J. (2003). "Empiricism in ecological economics: A perspective from complex system theory", *Ecological Economic*, 46(3), 387-398, Elsevier.
- Regolini, C. y Junyent, R. (2009). *Sustainable urban design*. Conference City Futures 2009, Madrid, España. En www.cityfutures2009.com
- Russell, L. y Adebisi, G. (1993). *Classical thermodynamics*. Florida: Saunders College Publishing.
- Sánchez-Rodríguez, R. (2008). "Urban sustainability and global environmental change: Reflections for an urban agenda". En *The new global frontier: Urbanization, poverty and environment in the 21st century*. Londres: Earthscan.
- Sen, A. (1999). "The possibility of social choice", *American Economic Review*, 89(3), 349-378, American Economic Association.
- Stiglitz, J. (1962). *Introducción a la teoría macroeconómica*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Smith, G. (1979). *Epilogue: Malthusian concern from 1800 to 1960 in the morality of scarcity: Limited resources and social policy*. Baton Rouge, EE. UU: Louisiana State University Press.
- Smith, J., Van Ness, H. y Abbot, T. (1996). *Introduction to chemical engineering thermodynamics*. Nueva York: McGraw-Hill.
- Tacoli, C., McGranahan, G. y Satterthwaite, D. (2008). "Urbanization, poverty and inequity: Is rural-urban migration a poverty problem, or part of the solution?". En *The new global frontier: Urbanization, poverty and environment in the 21st century*. Londres: Earthscan.
- Thurow, L. (1982). *La sociedad de suma cero*. Barcelona: Ediciones Orbis.
- Toledo, V. (2008). "Metabolismos rurales: Hacia una teoría económica-ecológica de la apropiación de la naturaleza", *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, 7, 1-26, Red Iberoamericana de Economía Ecológica.
- Wolman, A. (1965). "The metabolism of cities", *Scientific American*, 213, 1-17, Nueva York: Scientific American Inc.

- Whitaker, I. (2014). "How our water goes from the toilet to the tap", *Las Vegas Sun*, Sunday, agosto 24.
- United Nations (2000). *Informe del Milenio del Secretariado General*. Nueva York: Autor. En <http://www.un.org/spanish/milenio>
- United Nations Development Program (2009). *Informe sobre el Desarrollo Humano*. En <http://undp.org/es/desarrollohumano/origenes/>
- United Nations Human Settlements Programme-UN-Habitat (2011). *State of the World's Cities 2010/2011: Bridging the urban divide*. Londres: Autor.
- United Nations Department of Economic and Social Affairs (UNDESA) [2008]. *World urbanization prospects: The 2007 revision*. Nueva York: Autor.
- Yusuf, S. (2009). *Development economics through the decades: A critical look at 30 years of the World Development Report*. Washington: The World Bank.
- Zhang, Y., Yang, Z. y Yu, X. (2009). "Evaluation of urban metabolism based on emergy síntesis: A case study for Beijing, China", *Ecological Modelling*, (220), Elsevier.