

Cristian Julián Díaz Álvarez*

Metabolismo urbano: herramienta para la sustentabilidad de las ciudades

Resumen | La dinámica poblacional y formas de vida urbana de las medianas y grandes ciudades de Latinoamérica están determinando operaciones críticas que frenan el crecimiento económico, socavan el desarrollo, deterioran el ambiente, afectan la salud de sus residentes y reducen la oferta de bienes y servicios ambientales de los ecosistemas de soporte. Son escenarios de presión con los que se corre el riesgo de exceder los límites permisibles de su homeostasis y adaptabilidad; y por consiguiente, de exacerbar su vulnerabilidad en momentos en que la variabilidad y el cambio climático disminuyen las probabilidades de supervivencia de los sistemas humanos. Por tal motivo, y en aras de coadyuvar con la sustentabilidad y competitividad de la ciudad, el estudio del Metabolismo Urbano se constituye en un esfuerzo técnico, político y económico que facilita el entendimiento de sus redes de abastecimiento de materiales y energía, que busca la eficiencia y eficacia de sus procesos de transformación, así como la minimización del daño ambiental de sus desechos, permitiendo a los gestores de política anticiparse a eventos no deseados con base en las señales del presente.

51

Urban Metabolism: A Tool for the Sustainability of Cities

Abstract | The population dynamics and urban patterns gleaned from medium and big cities in Latin America are determining critical operations that brake economic growth, undermine development, damage the environment, affect human health and reduce goods and services supply from environmental ecosystems. They are pressure scenarios that involve the risk of exceeding permissible homeostatic limits and adaptability; and therefore, exacerbate their vulnerability when climate change decreases the survival probability of human systems. For this reason, in order to achieve the sustainability and competitiveness of cities, the study of Urban Metabolism becomes a technical, political and economic endeavor that facilitates our understanding of their materials and energy supply networks, seeking the efficiency and effectiveness of transformation processes, as well as reducing the environmental impact of their waste, enabling policy makers to anticipate unwanted events based on present signals.

* Universidad Central, Colombia. **Correo electrónico:** cdiaza2@ucentral.co

Palabras clave | metabolismo urbano – flujos de masa y energía – flujos de materiales – sostenibilidad – vida urbana

Keywords | urban metabolism – mass and energy flows – material flow – sustainability – urban life

El superorganismo urbano

TANTO LOS constructos y ambientes intervenidos por el hombre como los ecosistemas prístinos están conformados por partes y eventos que determinan relaciones internas y externas, que en conjunto definen el concepto común de sistema. Ambos se constituyen por “*elementos idealmente separables con interacciones entre sí*” (Margalef 2002, 80), base común que es el punto de partida para concebir el entendimiento de estas dos realidades, sugerir similitudes y proponer formas de modelación.

Ya sea un producto de los factores bióticos y abióticos, la fisicoquímica y la evolución —como lo es un sistema natural— o un producto de la cultura —como un asentamiento humano (Cuadro 1)— el sistema puede ser representado de acuerdo con la Teoría General de Sistemas (TGS)— y, con base en los intercambios de materia, energía e información dentro de sí y con el medio circundante. Esto es posible debido a que el “*complejo de sus elementos interactuantes puede ser matemáticamente distinguido conforme a su número, sus especies y las relaciones entre elementos*” (Bertalanffy 1976, 54).

La energía y la materia: elementos comunes pero diferenciados

La energía posibilita que los sistemas fisicoquímicos puedan sostenerse a sí mismos y aumenten su información potencial (Margalef 2002, 99). Es el “*origen*

Cuadro 1. Complejidad de un sistema urbano

La vida actúa sobre los elementos abióticos de cualquier sistema, determinando relaciones particularmente estrechas que pueden limitar sus estados futuros dentro de un número de posibilidades (Margalef 2002, 80). Esta realidad es posible que se acreciente en una construcción cultural debido a la prevalencia del interés general sobre el particular (Art.1°C.P., 2008), puesto que restringe el número de características emergentes y cualidades intrínsecas de sus componentes en aras de un bienestar colectivo. Sin embargo, desde la definición de Sutton & Harmon (1972, 29) de los aspectos básicos de energía, ciclos y población requeridos para el análisis de los ecosistemas, es probable que una ciudad exhiba una mayor riqueza de relaciones entre sus elementos y el entorno, puesto que el “*sistema parabiológico de adaptación al medio*” (A. Ángel 1995) —mediante el cual la sociedad establece lo real, lo posible, lo tangible y lo legítimo para producir sustento y organización— define un inmenso conjunto de rasgos que no existe en los sistemas naturales. Todo depende, como lo menciona Ramón Margalef (2002, 81), de la “*definición del sistema entero*”.

de toda actividad, transforma la materia [...] la vida misma existe sólo porque obtiene y pierde energía" (Sutton y Harmon 1976, 29). Esta es la razón por la cual, en el análisis de un sistema vivo, es menester examinar tanto su capacidad de producir trabajo con relación a la materia, como la información acumulada; y en un nivel superior, la conciencia adquirida y su relación hacia todos los lados y en todas las direcciones (Boff 2002, 75).

La energía que fluye y se transforma pierde capacidad de recuperar su magnitud y forma inicial. Esta condición natural, expresada por la Segunda Ley de la Termodinámica, indica que *"la entropía siempre aumenta en cualquier proceso irreversible que ocurra espontáneamente"* (Margalef 2002, 94). Por tal motivo, todas las transformaciones fisicoquímicas que se verifiquen en un sistema avanzarán en una dirección tal que el cambio de entropía total asociado con ellas sea positivo (Smith, Van Ness y Abbott 1997, 191), lo que aumentará su nivel de desorden. Por ende, en un sistema altamente complejo como la ciudad, se requerirá una mayor cantidad de energía para mejorar su organización y mantener sus funciones políticas, sociales, económicas y ecológicas (Carrizosa 2009, 85). Infaustamente, esta realidad conlleva una paradoja termodinámica, puesto que *"por cada estructura ordenada producida por el ser humano en el mundo se produce también una cantidad aún mayor de caos"* (Brown, Lemay y Burtens 1991, 755).

De igual manera, los sistemas naturales incurren en un gasto energético debido al intercambio de materia y energía, pero con la diferencia que en ellos se tiende a maximizar el desarrollo de trabajo al tener una *"extraordinaria eficacia en transformar el aumento de desorden en información útil"* (Margalef 2002, 96). Afirmación que comparte Leonardo Boff (2002, 72) al enunciar que *"gracias al orden interno y a la autorregulación de un sistema abierto, los seres vivos logran escapar en cierto modo de la entropía"*. Pero tarde o temprano, el desorden acumulado —tanto en las ciudades como en los sistemas naturales— provocará un cambio de estado irreversible que posiblemente no sea tan benévolo como las condiciones de no equilibrio descritas por Ilya Prigogine (1997, 2001).

La Segunda Ley de la Termodinámica rige los flujos secuenciales de energía en todas las esferas de la vida,¹ de un organismo a otro a través de relaciones de alimentación (Sutton y Harmon 1972, 61). Esto significa que, en los procesos clave de las cadenas tróficas,² la materia producida por unidad de tiempo y la energía por ella representada disminuyen, pero bajo un orden establecido que

¹ Biosfera, atmósfera, litósfera, hidrósfera y antropósfera.

² La entropía se verifica en la producción y consumo de materia orgánica —y su ulterior elaboración— en la descomposición de la misma en sus elementos orgánicos e inorgánicos, en la transformación de éstos en formas aprovechables para la nutrición de los productores y en el consumo de los predadores.

no afecta la estructura de las interdependencias, gracias a la reducción del número de individuos en los sucesivos niveles de la cadena alimenticia (Clarke 1971, 545). Algo que contradice la “*lógica humana*” de seguir creciendo en un mundo con recursos limitados (Cuadro 2).

Las ciudades, por su parte, cimientan su existencia a través de los intercambios de materia y energía con sus alrededores o con lejanos sistemas, y a la circulación interna de estos flujos entre los diferentes sectores de la economía.³ Luego de procesos físicos y/o químicos de manufactura, almacenamiento y uso, parte de los materiales indefectiblemente se configuran como emisiones, vertimientos y residuos⁴ que se disponen en sistemas externos o que se acumulan en la urbe. Por su parte, los productos útiles ayudan a mejorar el “orden” del sistema, definiendo adelantos tecnológicos, mejorando los servicios e incrementando la calidad y el nivel de vida del habitante urbano. De esta manera la ciudad logra cumplir, parcialmente, la función ecológica de “*reemplazar la calidad de vida rural*” (Carrizosa 2009, 85); pero en el proceso deteriora el entorno natural, debido en parte, a las restricciones de las leyes naturales y tecnológicas.

En mérito de lo anterior, y con base en la racionalidad de la Teoría y Dinámica de Sistemas, puede decirse que existe una similitud entre natura y las urbes (Figura 1). Aproximación viable debido a que los flujos de materia, energía e información en ambos están regidos por las mismas leyes y principios: la entropía, y la conservación de la energía y la materia. Semejanza que permite el análisis y cuantificación de estas corrientes mediante balances en los diferentes procesos de transformación, almacenamiento y consumo.

El devenir: de simples estructuras a sistemas complejos

En un principio, los asentamientos humanos —que dependían indefectiblemente de su tamaño, distribución espacial, desarrollo tecnológico y de los recursos y ciclos naturales— “*no generaban un deterioro ambiental en el largo plazo... y su tamaño y número dependían de su capacidad para extraer la comida y otros recursos de las áreas rurales*” (Stren, White y Whitney 1992, 11). Esta estrategia de provisión —que en la actualidad se ha deformado en inequidades sociales— “*requirió de un uso extensivo de mano de obra rural, una concentración de los*

3 Estos flujos, provenientes de ecosistemas, sistemas productivos rurales, otras ciudades y centros industriales, se expresan en forma de materias primas, insumos y materiales terminados, nomenclatura que depende de la oferta, demanda y uso final por parte de los consumidores.

4 De estos flujos, una fracción es reutilizada o reciclada para su reinyección en el sistema productivo, mientras que la porción no aprovechable —que todavía no se le conoce utilidad alguna— es la que se vierte, emite o dispone con o sin tratamiento.

Cuadro 2. Dinámicas de población y estructura: Natura vs. Urbe.

En cuanto a los cambios en los organismos vivos de un sistema cualquiera, los procesos evolutivos y de selección, el potencial biótico, el crecimiento y la magnitud (definida por las tasas de crecimiento, natalidad, mortalidad, migración neta y de cambio poblacional) definen si la población se expande, se contrae o se extingue.

La evolución —concebida desde la ecología como “*el proceso mediante el cual las poblaciones modifican sus características y contenido genético en el transcurso del tiempo*” (Sutton y Harmon 1972, 160)— y la coevolución —entendida como “*el cambio de las condiciones efectivas de selección que operan sobre los representantes de una especie, debido a la presencia de individuos de otra especie*” (Margalef 2002, 194)— determinan cambios en las características de los ecosistemas por acción biótica o abiótica de unidades propias o externas a lo largo del tiempo. Asimismo, conllevan y mantienen procesos de reemplazo gradual y continuo en sus elementos y relaciones, alcanzando un estado altamente complejo y de equilibrio. Sucesión que alcanza un clímax cuando el sistema logra estabilizarse.

Por su parte, la “evolución” de una ciudad —especialmente la colombiana— es el resultado fortuito de interrelaciones entre grupos de factores (Carrizosa 2009, 82), entre los cuales se encuentran: a) la abundancia de recursos naturales, b) las condiciones climáticas favorables, c) las facilidades de acceso para la transferencia de bienes y servicios, d) las épocas de confinamiento y aislamiento, e) los escenarios de estrategia militar y política, contextos de religión y fe, f) la capacidad de prestación de servicios públicos y administrativos, o simplemente, g) el tipo de gobierno.

El potencial biótico, definido como “la capacidad de los organismos para reproducirse en condiciones óptimas” (Sutton y Harmon 1972, 163) es similar en ambos tipos de sistemas. La diferencia estaría en que en los sistemas naturales existe una regulación asociada con la capacidad de carga, mientras que en los sistemas urbanos el crecimiento de la población se exagera sin control alguno; debido en parte a la actitud enajenada de los individuos en su relación con el entorno y a su falta de comprensión del enorme costo de oportunidad en que incurrir cuando conciben hijos en edades jóvenes, en condiciones de escasez de recursos y de baja formación educativa. Crecimiento desmedido que se ha venido advirtiendo desde el siglo xviii, cuando Thomas Robert Malthus (1798, 54) afirmó que: “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”.

Desde el punto de vista de la expansión y crecimiento en función de la dinámica poblacional, la dimensión espacial de un ecosistema se despliega tanto en el eje vertical (capas) como en el plano horizontal (círculos concéntricos u otra forma geométrica). Este tipo de organización “se refleja en la posición de los niveles donde el movimiento neto de los nutrientes es hacia los organismos vivos, o donde se apartan de ellos” (Margalef 2002, 137). De igual manera, la estratificación en las ciudades también es vertical u horizontal, y está definida por la disponibilidad de capital, los precios de la tierra y los Planes de Ordenamiento Territorial (POT's) y de Ordenamiento y Manejo de Cuencas (POMCA's), entre otros factores. En términos generales, el potencial biótico, la dinámica, la magnitud y las tasas de natalidad, mortalidad, crecimiento, migración neta y cambio poblacional, representan conceptos similares en la ecología de poblaciones tanto en centros urbanos como en los sistemas naturales.

Estas concausas han permitido que las ciudades se hayan configurado a través del tiempo no sólo en “espacios de transformación tecnológica de los recursos” (Ángel y Velásquez 2008, 14) sino en “sistemas que incluyen la mayoría de bienes y servicios que las personas necesitan para vivir... entidades que usan su talento local para aumentar sus posibilidades y oportunidades” (Munier 2006, 90). Son composiciones culturales de individuos, comunidades y poblaciones soportadas por las comunicaciones, la educación, el sistema de salud, las viviendas, la economía, la industria, el comercio, el transporte, la infraestructura, el gobierno y el ambiente.

* Sin embargo, esa estabilidad puede romperse debido a la acción del hombre o a fenómenos naturales recurrentes o intempestivamente apocalípticos.

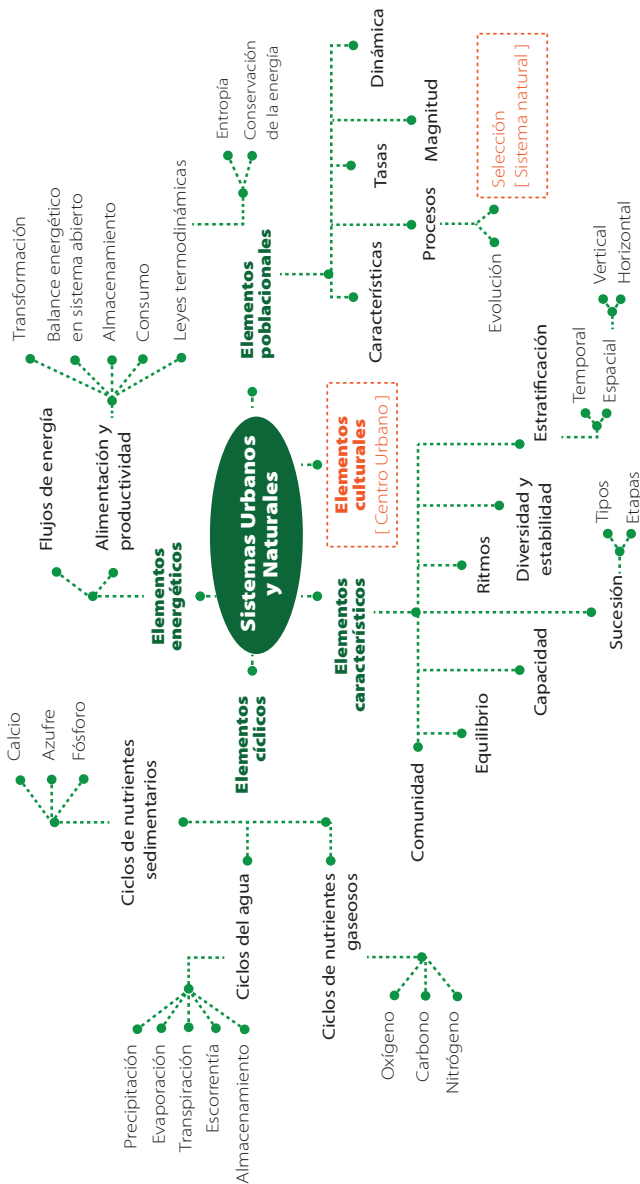
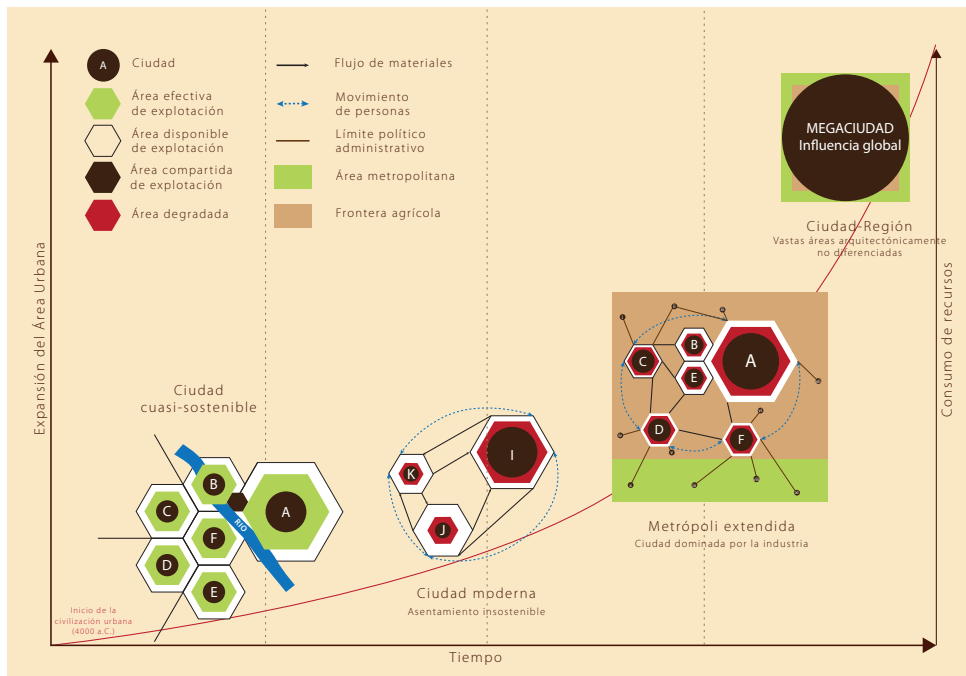


Figura 1. Mapa mental de los elementos ecosistémicos comunes en los sistemas urbanos y los sistemas naturales
Nota: Este mapa muestra las entidades comunes en las entidades de segundo nivel de color verde y diferencia los aspectos culturales en los centros urbanos y los procesos de selección natural en los sistemas naturales (recuadros en línea discontinua roja). Elaboración (Díaz 2011)

bienes y servicios en las ciudades y una explotación de las zonas rurales” (Stren, White y Whitney 1992, 11).

Esta forma local de abastecimiento fue extrapolada a la geopolítica mundial desde la colonia, y se ha mantenido, ya no por los imperios sino por los países desarrollados, las corporaciones e individuos, en un proceso de globalización que no es más sino *“otra fase en el desarrollo internacional de las relaciones, más allá de la mera internacionalización o interdependencia”* (Reinicke 1997, citado en Friedman 2006, 85). Con esta vigente apropiación del territorio y del espacio, los centros urbanos establecen sus relaciones y nivel de entropía con los territorios de los cuales se abastecen (Gráfica 1), con la subsecuente probabilidad de ocurrencia de cambios no deseados para los cuales no están preparados. Situaciones inesperadas y en periodos cortos de tiempo que no pudieron ser afrontadas correctamente por algunas ciudades del pasado, como por ejemplo Rapa Nui en la Isla de Pascua, las ciudades estado Mayas en la península de Yucatán, Harappa en el Valle del Indo y Angkor en la actual Camboya, entre otras.



Gráfica 1. El devenir de los sistemas urbanos.

Nota: Gráfico elaborado con base en los resultados de Díaz (2011) y las propuestas de Stern, White y Whitney (1992) y Cacciari (2010).

Estos asentamientos urbanos sufrieron “*un drástico descenso en el tamaño de la población humana y/o en la complejidad política, económica y social durante un periodo de tiempo prolongado... debido, entre otros aspectos, a un suicidio ecológico impremeditado*” (Diamond 2006, 23). Acción provocada en gran medida por el crecimiento demográfico, que generó una presión desmedida sobre la infraestructura y capacidad instalada, un cambio en los flujos de materia, energía, información y dinero, y definitivamente, sobre la oferta ambiental de las áreas productivas que los soportaban.

Puesto que “*nada habrá que antes no haya habido*” (Eclesiastés 2009, 1–9) el devenir descontrolado de un centro urbano se traduce en la sobre explotación de los sistemas naturales, en el cambio climático de origen antrópico, en la pérdida de la calidad del aire, del agua y del suelo, en el incremento de la concentración de sustancias químicas en el ambiente e, indudablemente, en la destrucción del propio hábitat. El riesgo de superar los límites de su capacidad de carga, homeostasis y adaptabilidad es real, e incrementa la probabilidad de un colapso en su interior y/o en los sistemas que lo abastecen.

Pero, si el comportamiento individual y colectivo de los individuos logra que una ciudad persista en el tiempo, el sistema mantendrá un orden que se verá reflejado en el mejoramiento de los servicios de salud, educación, transporte, suministro de agua y energía, en el enriquecimiento cultural, el afianzamiento de la fe y la religión y la cualificación de su población económicamente activa. Pero al fin de cuentas, la ciudad, al igual que un sistema natural, alcanzaría un clímax —llegaría a un límite óptimo de existencia— el cual nunca podrá ser trasgredido debido al rigor de las leyes naturales, por lo que un crecimiento indefinido es imposible desde el punto de vista termodinámico.

En síntesis, los elementos bióticos y abióticos, las propiedades intrínsecas y emergentes y los complejos procesos inmersos en relaciones de poder de esta “*revolucionaria forma de vida asociada*” (Cacciari 2010, 26) definen una característica fundamental: la vida. Es por esto que en la cultura urbana⁵ se validaría la consideración de ciudad como sistema vivo, proposición fundamental para el análisis de metabolismo urbano.

El metabolismo: la base conceptual

El simil ciudad, sistema natural y organismo, es concebido por Owiti K’Akumu

⁵ Esta cultura, como naturaleza transformada (Ángel & Velásquez 2008:15), ha modificado las condiciones prístinas de un sistema natural, pero sigue siendo parte de la naturaleza. Asimismo, es importante reconocer que “*no existe la ciudad, sino que existen diversas y diferenciadas formas de vida urbana*” (Cacciari, 2012:26).

(2007, 222) como la “*Conceptualización Ecológica de las Ciudades*”, en la cual los centros urbanos se piensan y analizan como seres vivientes que crecen, logran desarrollo y que, en algún momento, pueden morir. Esta comprensión tiene sus orígenes en el trabajo pionero de (Wolman 1965, 179) sobre el metabolismo de las ciudades —*The Metabolism of Cities*— con el cual se intentó dar respuesta al por qué de la pérdida de la calidad del agua y el aire en los centros urbanos de Norte América. Este modelo, representado a través de diagramas de bloques y soportados por ecuaciones de balance, logró relacionar los flujos de materia que entran en una ciudad con la cantidad de desechos que ésta genera.

La reciente definición de metabolismo urbano efectuada por (Kennedy, Cuddihy y Engel-Yan 2007, 44) —“*la suma total de los procesos técnicos y socioeconómicos que ocurren en las ciudades, resultando en crecimiento, producción de energía y eliminación de desechos*”— ha dimensionado holísticamente las primeras propuestas de Wolman (1965) —“*todos los materiales y materias primas necesarios para mantener los habitantes de una ciudad, en una casa, en el trabajo y en el juego*”— y de Scott Cook (1973) —“*el proceso por medio del cual los miembros de toda sociedad se apropian y transforman ecosistemas para satisfacer sus necesidades y deseos*”— propugnando la concepción de la ciudad como una realidad compleja, tanto en la suma de las partes como en los elementos que la componen. Aun así, estas tres proposiciones intrínsecamente conservan los siguientes elementos comunes: los procesos, los flujos de materia y energía y la sociedad.

Desde una visión puramente fisicoquímica, en la que la ciudad se percibe como un sistema que “*consume una variedad de materiales... que son procesados y transformados en una gran cantidad y variedad de productos y subproductos sin precedentes y no naturales*” (K’Akumu y Oyugi 2007, 224), hasta la concepción de los flujos de materia y energía como vías de conexión entre el sistema económico y el ambiente circundante (Eurostat 2001, 11), la analogía de las ciudades como súper organismos ha configurado “*un modelo híbrido entre los sistemas ecológicos y económicos*” (Zhang, Yang y Yu 2009, 1690), que según Víctor Toledo (2008, 3) “*implica el conjunto de procesos por medio de los cuales los seres humanos organizados en sociedad, independientemente de su situación en el espacio —formación social— y en el tiempo —momento histórico— se apropian, circulan, transforman, consumen y excretan materia y/o energía provenientes del mundo natural*”.

Por tal motivo, el metabolismo (Figura 2) permite la coexistencia de los elementos naturales de un centro urbano con los valores económicos y sociales que sus individuos hacen de él y de los ecosistemas que lo rodean, soportan y sufren su actividad. Contribuye a la medición de la sostenibilidad de las metrópolis a través del entendimiento del complejo sistema que la constituye y de los

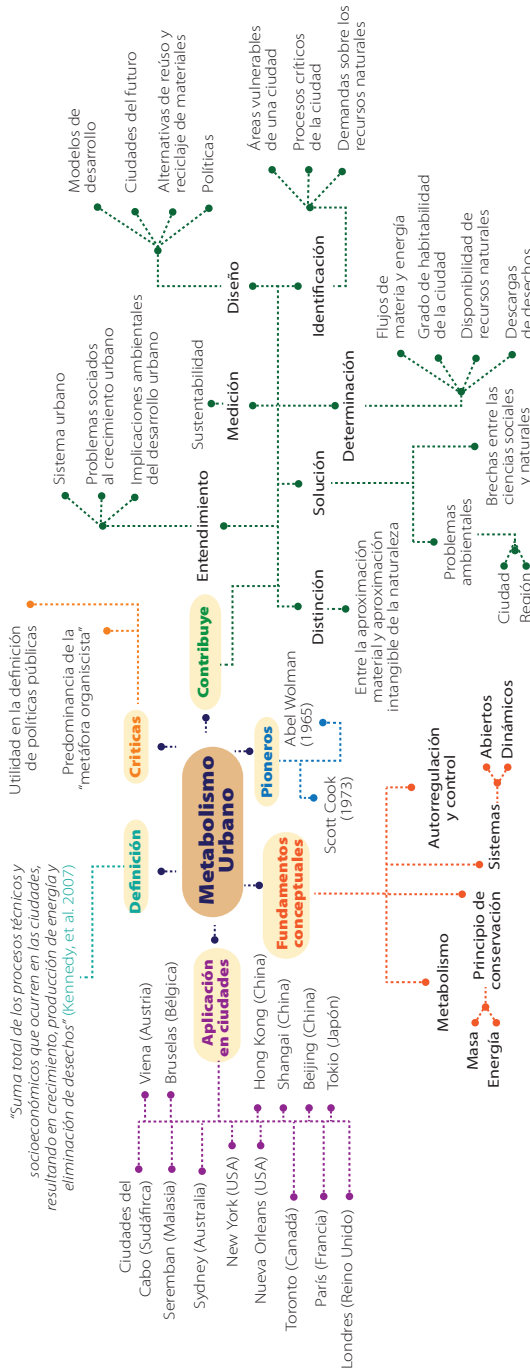


Figura 2. Mapa mental de los elementos básicos involucrados en el tema del metabolismo urbano.

Nota: Entidades de segundo nivel de color beige. Elaboración: (Díaz 2011).

problemas asociados a su crecimiento (Girardet 1992; Newman 1999; Haberl 2001; K'Akumu y Oyuki 2007). Adicionalmente, concurre a la solución de problemas ecológicos y ambientales al destacar e identificar las demandas de una ciudad sobre los recursos naturales y las presiones de sus descargas de desechos en los sistemas naturales (Zhang et al., 2009, 1690) y, a “*observar la disponibilidad natural y antrópica de los recursos y su uso, de manera que no perjudique el ambiente actual o futuro*” (Brunner 2007, 12).

Por su parte, otros investigadores lo han utilizado para determinar el grado de habitabilidad de un centro urbano y evidenciar sus áreas vulnerables (Idrus et al. 2008, 1690), para identificar procesos críticos en su interior que atentan contra la sustentabilidad (Kennedy, Cuddihy y Engel Yang 2007, 44), y para proponer alternativas de reutilización y reciclaje de materiales y agua con el objeto de suplir la creciente demanda de los diferentes sectores de su economía (Hermanowicz y Asano 1999, 34). Asimismo, el metabolismo es utilizado por empresas consultoras para el modelado de oferta y demanda de recursos en sistemas urbanos sujetos a procesos de reconstrucción luego de eventos catastróficos (Camp, Dresse; McKee Inc – CDM Inc 2009, 2).

No obstante, el concepto tiene críticas por la predominancia de la “*metáfora organicista*” y su uso para el entendimiento de sistemas cambiantes que no sólo se determinan fisicoquímicamente (Gandy 2004, 364), y en cuanto a su utilidad en la definición de políticas públicas (Marcuse 2005). Sin embargo, esto último es debatible, puesto que el metabolismo sí ha permeado las instancias de doctrina, dirección, orientación y opinión conducentes a lograr y asegurar la sustentabilidad de las ciudades (Levine, et al. 2008; K'Akumu y Oyugi 2007; Zhang, Yang y Yu 2009a). Más aún, su modelado es concebido como “*elemento clave y oportunidad única de los hacedores de política para desarrollar planes que influencien positivamente el consumo y conservación de los recursos*” (Camps, Dresse; McKee Inc – CDM Inc 2009). Adicionalmente, su estudio se considera en los proyectos de ciudades de futuro como una dimensión *sine qua non* de la sostenibilidad urbana, “*con la cual la ciudad se reinserta en la naturaleza y la naturaleza en la ciudad*” (Regolini y Junyent 2009).

Así pues, el metabolismo urbano se constituye en un concepto útil, flexible, certificado y reconocido por la academia, la industria, la sociedad y el gobierno, que ayuda en el entendimiento de las ciudades y su dinámica, y en la búsqueda de su permanencia en el espacio y el tiempo. Esto se debe a la polivalencia de su noción desde las perspectivas técnica, multidisciplinaria, ecológica y económica. A partir de la primera, permite determinar los flujos de materia y energía en un sistema económico y social; desde varias perspectivas disciplinarias se constituye como un concepto que “*cierra las brechas entre las ciencias sociales y las ciencias naturales*” (Haberl 2001, 19); desde el lente ecológico, tiene por

objeto promover el entendimiento de las implicaciones ambientales del desarrollo urbano (K'Akumu y Oyugi 2007, 222); y desde la visión de la economía ecológica, permite “*determinar y distinguir entre la aproximación material y la apropiación intangible de la naturaleza por parte de los seres humanos*” (Toledo 2008, 5).

Los flujos de materia y energía

La identificación, cálculo y análisis de los flujos de materia y energía se constituyen en el centro metodológico para la determinación del metabolismo de un sistema urbano, puesto que con ellos “*se puede hacer seguimiento a los movimientos de los bienes y sustancias de una ciudad desde el medio circundante*

El metabolismo urbano se constituye en un concepto útil, flexible, certificado y reconocido por la academia, la industria, la sociedad y el gobierno, que ayuda en el entendimiento de las ciudades y su dinámica, y en la búsqueda de su permanencia en el espacio y el tiempo. Esto se debe a la polivalencia de su noción desde las perspectivas técnica, multidisciplinaria, ecológica y económica

y de abastecimiento, a través de la producción y consumo y de vuelta a los departamentos aire, agua y suelo” (Brunner 2002, 8). Asimismo, permite el conocimiento de la cantidad de trabajo (en términos de energía) que el sistema urbano es capaz de realizar y el gasto que ejercieron y ejercen los sistemas de abastecimiento.

El análisis de estos flujos se fundamenta matemáticamente en los balances, cuya aplicación conceptual se establece desde las Leyes o Principios de la Conservación de la Masa y la Energía. Para el caso de la materia, los balances deben respetar la razón fundamental de que ninguna masa es creada o destruida por proceso alguno de transformación fisicoquímica; tal como lo enunciaron los padres de la química moderna, Antoine Lavoisier (1785) y Mijail Lomonósov (1745): “*en todas las acciones del arte y la naturaleza, nada es creado; una cantidad igual de materia existe, tanto antes como*

después del experimento” (Lavoisier 1789; citado en: Brown, Lemay y Bursten 1991, 75). Esta proposición clara y evidente, que en la actualidad se admite sin necesidad de demostración, enuncia el principio fundamental de que en cada proceso hay exactamente la misma cantidad de sustancia antes y después de

que éste haya sucedido. Asimismo, para el caso de la energía, los balances contemplan que, aunque tome muchas formas, la cantidad total de ésta es constante, y cuando desaparece de una forma, simultáneamente aparece en otras (Smith, Van Ness y Abbott 1997, 22). Es decir, los balances realizados para determinar la capacidad de un sistema para realizar un trabajo acatan el axioma de que *“la energía total de cualquier sistema y su medio que lo rodea —considerados juntos— se conserva”* (Abbott y Van Ness 1969, 37).

Aunque regularmente ambos balances se efectúan por separado, es importante resaltar su complementariedad, ya que *“su estudio simultáneo permite un complejo entendimiento del metabolismo de una sociedad”* (Haberl 2001, 13). Asimismo, ambos tienen la ventaja de ser concebidos desde una perspectiva sistémica o desde la dirección y características fisicoquímicas de los flujos (Eurostat 2001, 11). Es decir, los balances pueden definirse globalmente —de manera agregada— o de acuerdo con sustancias o procesos en particular —balances parciales— estableciendo diferentes escalas de estudio que pueden ser aplicadas en los ámbitos nacional, regional y/o local, y en espacios urbanos o rurales.

El estudio de los flujos de materia en este contexto se denomina Análisis o Contabilidad de Flujos de Materiales (MFA, por sus siglas en inglés), con el cual se logra monitorear, analizar y gestionar el medio ambiente con base en la medición de las magnitudes y localización de los flujos específicos de materiales (Brunner 2002; Daniels 2002; Daniel 2006, 66). Asimismo, posibilita el conocimiento del metabolismo de un sistema económico, derivando indicadores agregados de uso de recursos, de productividad y ecoeficiencia, y de intensidad del estilo de vida de los individuos. Los MFA se constituyen así como una estructura de análisis de cuentas nacionales, flexible e integrada a las demandas políticas, y en el punto de partida para el modelado ambiental urbano en cuanto a sus corrientes de desecho se refiere (Eurostat 2001). La utilidad del estudio de los flujos de materiales en un sistema se puede enmarcar globalmente en la afirmación que hace Paul Brunner (2002, 8) en su análisis prospectivo de los MFA: *“es una fina herramienta para la protección y conservación de los recursos en la antroposfera y en el ambiente”*.

Por su parte, la cuantificación de los flujos de energía en la economía *“ha sido por décadas una parte importante en las estadísticas de los países industrializados”* (Haberl 2001, 12). Estos estudios comparativos de las circunstancias y/o factores que intervienen o definen la seguridad energética, el crecimiento y el medio ambiente, se realizan verificando las cifras de oferta y de demanda⁶ de

6 La oferta está constituida por la producción, las importaciones, las exportaciones y los cambios en los inventarios y reservas; por su parte la demanda considera la transformación de la energía y los usuarios finales.

los sectores económicos y del portafolio energético de un país o región. Razón por la cual, las tareas de recolección y análisis estadístico se consideran la base para representar, de manera agregada, la situación energética de un sistema determinado⁷, y *“para soportar la información de los mercados energéticos mundiales”* (IEA 2009, 3).

Actualmente, los balances de energía (con un desarrollo paralelo de balances de materia) se consolidan como herramientas para la construcción de inventarios de emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) en países no firmantes del protocolo de Kyoto (Murtishaw, et al. 2005) y de las comunicaciones nacionales ante el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC). Adicionalmente, son base para el análisis y seguimiento de las tendencias de consumo energético y emisión de estos gases en sectores económicos de los países y en organizaciones supranacionales.

Así pues, los estudios energéticos, desde una perspectiva ambiental, se emplean *“para coordinar los esfuerzos nacionales encaminados a conservar la energía y desarrollar fuentes alternativas tanto para limitar la contaminación como para mitigar el cambio climático”* (IEA 2009, 3). Desde el punto de vista termodinámico, el balance energético de una ciudad no sólo permite verificar la Primera y Segunda Ley, sino que valida el hecho que *“el impacto del desarrollo urbano en el ambiente es irreversible”* (Ouyang, et al. 2007, 434), siendo los procesos de urbanización una fuerza impulsora del inevitable cambio de estado de estos sistemas abiertos.

Desde la práctica, los análisis de flujos de materia y energía (principalmente de materia) respaldan los estudios urbanos y ecosistémicos de ciudades como Bogotá (Díaz 2011), Bruselas (Duvigneaud y Denaeyer–De Smet 1977), Tokio (Hanya y Amber 1976), Hong Kong (Newcombe, Kalina y Aston 1978; Warren–Rhodes y Koenig 2001), Sydney (Newman 1999), Toronto (Sahely, Dudding y Kennedy 2003), Viena (Hendricks, et al. 2000), Londres (White 2003), Ciudad del Cabo (Hendricks, et al. 2000), Seremban (Idrus, et al. 2008), Nueva Orleans (Camp, Dresse; McKee Inc – CDM Inc 2009), Shangai y Beijing (Zhang, Yang y Yu, 2009b), París (Barles 2009) y Nueva York (Kane y Erickson 2007) (Figura 3). Adicionalmente, los MFA trascienden los estudios de ciudad para ser utilizados en el ámbito nacional y supranacional para *“determinar las cantidades de materiales que entran a una economía, las acumulaciones y las salidas a otras economías o al sistema natural circundante”* (Eurostat 2001, 9), y en la *“descripción de la evolución potencial de la contaminación ambiental por sector industrial en el orden nacional”* (Malavasi, A. y G. 2005).

7 De tal manera que se reduzca el riesgo de desabastecimiento gracias al diagnóstico, estudio prospectivo y toma de decisión, por parte de los hacedores de política.



Figura 3. Ciudades que cuentan con estudios de metabolismo urbano.

Nota: Ciudades en las cuales se han efectuado estudios de metabolismo urbano para: a) análisis de sostenibilidad, crecimiento, disponibilidad de recursos, habitabilidad y vulnerabilidad, b) solución de problemas ambientales, reutilización y reciclaje de materiales y agua, y c) identificación de procesos críticos y reconstrucción de ciudades.

En síntesis, las ciudades, concebidas ya sea como súper organismos urbanos (Zhang, et al. 2009, 1960), organismos cibernéticos —mitad natural, mitad artificial— (Swyngedouw 2006), sistemas complejos y dinámicos (Newman 1999, 220), áreas metropolitanas vivientes (Moore 2007, 30) o sistemas vivos como se propone en este artículo, indiscutiblemente exhiben procesos metabólicos que para ser analizados deben expresarse matemáticamente a través de balances de materia y energía. Tarea apremiante, ya que la estructura de la civilización urbana sufre un proceso irreversible de expansión, cada vez menos gobernable o programable (Cacciari 2010), que devora áreas cultivables, de amortiguamiento y reserva; y que presiona los sistemas de abasto y provisión. Fenómeno urbanístico que, sumado a la variabilidad y el cambio climático, exacerbaban la crisis ambiental urbana, que en última instancia puede poner en riesgo la sostenibilidad de la ciudad, y en el peor de los casos, su existencia.

Conclusiones

— Cualquier ciudad puede ser concebida y analizada como un ecosistema complejo conformado por elementos bióticos y abióticos, tanto naturales como de origen antrópico. Este concepto no es un simple tropo que traslada

el sentido de un sistema natural a un sistema urbano, ya que los sistemas cultural, económico y social no pueden hacer caso omiso a la termodinámica. Esta verdad determina que todas aquellas acciones encaminadas a lograr la sostenibilidad ambiental urbana deberán obedecer la constancia y certeza de las leyes naturales.

- Un elemento adicional de la concepción de la ciudad como organismo es la consideración del real y completo ciclo de la vida, ya que no sólo una urbe se funda y crece indefinidamente, también puede llegar al término de su existencia luego de un colapso inducido por un trastorno ecológico deliberado o impremeditado.
- La muerte, trance lógico y constituyente de la vida, determina una contradicción con el concepto tradicional de la sostenibilidad, ya que la existencia de un sistema nunca se podrá mantener indefinidamente en un sólo 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.
- La conceptualización, cálculo y análisis de los principales flujos de materia y de energía que se involucran en el gran proceso termodinámico de una ciudad, permiten vislumbrar la magnitud de su consumo y de las implicaciones ambientales sobre sí misma y sobre los sistemas naturales que la abastecen y soportan. Esta aproximación facilita el entendimiento de las implicaciones ambientales en el crecimiento económico y desarrollo urbano, puesto que se complementa con algunos elementos relacionados con la lógica económica y social, al correlacionar los aspectos fisicoquímicos de la urbe con el comportamiento de su crecimiento y de su población.

Referencias

- Abbott, M., y H. Van Ness. *Teoría y problemas de termodinámica*. Cali: MacGraw-Hill, 1969.
- Ángel, A. *Desarrollo Sostenible, aproximaciones conceptuales*. Quito: Fundación Natura y UCIN, 1995.
- Ángel, A., y L Velásquez. «Estudios ambientales urbanos.» Editado por Instituto de Estudios Ambientales – Universidad Nacional de Colombia. *Revista Gestión y Ambiente* 11, no. 1 (Mayo 2008).
- Barles, S. «Urban metabolism of Paris and its region.» *Journal of Industrial Ecology* 13, no. 6 (2009).
- Bertalanffy, L. *Perspectivas en la teoría general de sistemas, estudios científico – filosóficos*. Madrid: Editorial Alianza Universidad, 1976.
- Boff, L. *Ecología: grito de la tierra, grito de los pobres*. Madrid: Editorial Trotta, 2002.

- Brown, T, H. Lemay, y B. Bursten. *Química: la ciencia central*. Traducido por M. Hidalgo. México, D.F.: Prentice Hall Hispanoamericana, 1991.
- Brunner, P. «Beyond material flow analysis.» *Journal of Industrial Ecology* (MIT Press) 6, no. 1 (2002).
- . «Reshaping Urban Metabolism.» *Journal of Industrial Ecology* (MIT Press Journals) 11, no. 2 (2007).
- Cacciari, M. *La ciudad*. Traducido por Moisés Puente. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 2010.
- Camp, Dresser, y McKee Inc. *Modeling urban metabolism of New Orleans Louisiana*. Massachusetts: CDM, 2009.
- Carrizosa, J. «Ciudades nuevas sostenibles en las regiones del Caribe y Orinoquía.» *Revista de Ingeniería* (Universidad de los Andes), no. 30 (Noviembre 2009).
- Clarke, G. *Elementos de ecología*. Traducido por Fusté, M. Barcelona: Ediciones Omega, 1971.
- Cook, S. «Production, ecology and economic anthropology: notes towards an integrated frame of reference.» *Social Science Information* (University of California Press) 12, no. 1 (1973).
- Daniels, P. “Reducing society’s metabolism.” In *Business within limits: deep ecology and buddhist economics*, edited by Im. L. Zsolnai and Knut J., 103–148. Oxford: Peter Lang Academic, 2006.
- . “Approaches for quantifying the metabolism of physical economies: a comparative survey: Part II Review of Individual Approaches”. *Journal of Industrial Ecology* (MIT Press) 6, no. 1 (2002): 65–88.
- Diamond, J. *Colapso: por qué unas sociedades perduran y otras desaparecen*. Bogotá D.C.: Editorial Random House Mondadori Ltda, 2006.
- Díaz, C. «Bogotá: entre el espejismo del crecimiento y la utopía del metabolismo sostenible.» *Cuadernos de Utopía Colombia* (Universidad Central), no. 2 (2012).
- . *Metabolismo urbano de la ciudad de Bogotá: herramienta para el análisis de la sostenibilidad ambiental urbana*. Bogotá, D.C.: Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- Duvigneaud, P., y S. Denaeyer – De Smet. *The Brussels urban ecosystem. Productivité en Belgique: travaux de la section Belge du programme biologique international*. Brussels. París: Edition Duculot, 1977.
- Eclesiástes. «Nada merece la pena». En *La Biblia para el pueblo de Dios*. (San Pablo), 2009.
- Eurostat. *Economy-wide material flow accounts and derived indicator: a methodological guide*. Luxemburg: Office for Official Publications of the European Communities, 2001.
- Friedman, T. *The world is flat: a brief history of the twenty-first Century*. New York: Farrar, Straus and Giroux, 2006.

- Gandy, M. «Rethinking urban metabolism: water, space and the modern city.» *City* (Routledge – Taylor & Francis Group) 8, no. 3 (2004).
- Gasson, B. «The ecological footprint of Cape Town: unsustainable resource use and planning implication.» *SAPI International Conference: planning Africa*. Durban, South Africa, 2002.
- Girardet, H. *The Ghaia atlas of cities: New directions for sustainable urban living*. New York: Anchor Books, 1992.
- Haberl, H. «The energetic metabolism of societies. Part 1: accounting concepts.» *Journal of industrial ecology* (Wiley InterScience) 5, no. 1 (2001).
- Hanya, T., y Y. Amber. *A study on the metabolism of cities. Science for a better environment*. Tokyo: HSEC Science Council of Japan, 1976.
- Hendricks, C., R. Obernosterer, D. Muller, S. Kytzia, P. Baccini, and P. Brunner. «Material flow analysis, a tool to support environmental policy decision making: case study on the city of Vienna and the Swiss lowlands.» *Local Environment* (Local Environment) 5, no. 3 (2000): 311–328.
- Hermanowicz, S., y T. Asano. «Abel Wolman's "The Metabolism of Cities" revisited: a case of study for water recycling and reuse.» *Water Scientific Technology* (Elsevier Science Ltda) 40, no. 45 (1999).
- Idrus, S., A. Hadi, A. Harman, y M. Mohamed. «Spatial urban metabolism for a livable city.» *Blue prints for sustainable infrastructure conference*. Auckland, New Zealand, 2008.
- IEA. *¿What does the IEA do?* París: International Energy Agency. Disponible en: <http://www.iea.org/journalist/faq.asp>, 2010.
- . *Key world energy statistics*. París: International Energy Agency. Disponible en: <http://www.iea.org/journalist/faq.asp>, 2009.
- Jones, G. «Studying extended metropolitan regions in South-East Asia.» *XXIV General Conference of the IUSSP, Salvador, Brazil*. 18–24 de August de 2001. www.iussp.org/Brazil2001/s40/S42_02_Jones.pdf (último acceso: 21 de marzo de 2009).
- K'Akumu, O., y M. O. Oyugi. «Land use management challenges for the city of Nairobi.» *Amsterdam: Urban Forum (Springer)* 18, no. 1 (2007): 94–113.
- Kane, M., y J. Erickson. «Urban metabolism and payment for ecosystem services: history and policy analysis of the New York City water supply.» *Advances in the economics of environmental resources* (Emerald Group Publishing Limited) 7 (2007): 307–328.
- Kennedy, C., J. Cuddihy, y J. Engel-Yan. «The changing metabolism of cities.» *Journal of Industrial Ecology* (MIT Press) (Posted Online May 11, 2007) 11, no. 2 (Spring 2007): 43–59.
- Kennedy, C. *Urban metabolism. Green view*. London: The Economist. Global Agenda., 2009.

- Levine, R., M. Hughes, C. Mather, y E. Yanarella. "Generating sustainable towns from Chinese villages: a system modelling approach." *Journal of Environmental Management* (Elsevier), no. 87 (2008).
- Malavasi, L., S. Huschny A., y Gallopin G. «Evolución de las emisiones industriales potenciales en América Latina, 1970 – 2000.» *Serie Medio Ambiente y Desarrollo* (División de Desarrollo sostenible y Asentamientos Humanos – CEPAL), no. 97 (2005).
- Malthus, T. R. *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*. London: Johnson, 1798.
- Marcuse, P. «The city: as perverse metaphor.» *City* (Routledge – Taylor & Francis Group) 9, no. 2 (2005).
- Margalef, R. *Teoría de los sistemas ecológicos*. Barcelona: Alfaomega grupo editor, 2002.
- Mbuyi, K. *Kinshasa: problems of land Management, infrastructure and food supply*. Nairobi, Kenya: Centre for Urban Research, 1989.
- Moore, S. «How to measure a city's metabolism: taking stocks of London appetites.» *IEEE Spectrum* 44, no. 6 (2009).
- Munasinghe, M., O. Sunkel, y C. De Miguel. *The Sustainability of Long-term Growth: Socioeconomic and ecological perspectives*. Great Britain: The World Bank, 2001.
- Munier, N., ed. *Handbook on urban sustainability*. Sevilla, España: Springer, 2006.
- Murtishaw, S., S. De la Rue, L. Price, E. Masanet, y J. Sathaye. *Development of energy balances for the state of California*. California: California Climate Change Centre & California Energy Commission (Disponibile en: <http://industrial-energy.lbl.gov/node/78>), 2005.
- Newcombe, K., J. Kalina, y R. Aston. "The metabolism of a city: the case of Hong Kong." *Journal of the Human Environment – Ambio* (Royal Swedish Academy of Sciences), no. 7 (1978).
- Newman, P. «Sustainability and cities: extending the metabolism model.» *Landscape and Urban Planning* (Elsevier), no. 44 (1999).
- Odum, E. *Ecología: El Vínculo entre las Ciencias Naturales y las Sociales*. México D.F.: Continental, 1998.
- Ouyang, T., S. Fu, Z. Zhu, Y. Huang, N. Huang, y Z. Wu. "A new assessment method for urbanization environmental impact: urban environment entropy model and its application." *Environment Monitoring Assessment* (Springer Science and Business Media), December 2007.
- Prigogine, I. *El fin de las certidumbres*. Traducido por Pierre Jacomet. Madrid: Grupo Santillana de Ediciones S.A., 2001.

- . *Las leyes del caos*. Traducido por Juan Vivanco. Barcelona: Editorial Drakontos, 1997.
- Regolini, C., y R. Junyent. “Sustainable urban design.” *Conference city futures 2009*. Madrid: www.cityfutures2009.com, 2009.
- Sahely, H., S. Dudding, y C. Kennedy. “Estimating the urban metabolism of Canadian cities: GTA case study.” *Canadian Journal for Civil Engineering* 30 (2003).
- Smith, J., H. Van Ness, y M. Abbott. *Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química*. Traducido por E. Urbina y M. Hidalgo. México, D.F. McGraw-Hill, 1997.
- Stren, R., R. White, y J. Whitney. *Sustainable Cities: Urbanization and The Environment in International Perspective*. Colorado: Westview Press, 1992.
- Sutton, D. y N. Harmon. *Fundamentos de Ecología*. México, D.F: Editorial Limusa, 1972.
- Swyngedouw, E. «Metabolic urbanization: the making of cyborg cities.» En *The nature of cities: urban political ecology and the politics of urban metabolism*. London: Routledge, 2006.
- Vega, L. *Gestión Ambiental Sistémica: Un Nuevo Enfoque Funcional y Organizacional para el Fortalecimiento de la Gestión Ambiental Pública Empresarial y Ciudadana en el Ámbito Local*. Bogotá: El Astillero, 2001.
- Warren – Rhodes, K., y A. Koenig. “Escalating trends in the urban metabolism of Hong Kong 1971 – 1997.” *Journal of the Human Environment – Ambio* (Royal Swedish Academy of Sciences.), no. 30 (2001).
- White, R. *Building the ecological city*. Cambridge: Woodhead, 2003.
- Wolman, A. “The metabolism of the city.” *Scientific American* 213, no. 3 (1965): 179–190.
- World Health Organization. «Healthy Cities Initiative: Approaches and Experience in the African Region. Brazzaville. Africa.» *World Health Organization*. 2002. www.afro.who.int/eph/publications/healthy-cit-ini-ev-manual.pdf (último acceso: 20 de marzo de 2009).
- Zhang, Y., Z. Yang, and X. Yu. “Ecological Network and energy analysis of urban metabolic systems: model development and case study of four chinese cities.” *Ecological Modelling* (Elsevier) 220 (2009a).
- Zhang, Y., Z. Yang, y X. Yu. «Evaluation of urban metabolism based on energy synthesis: a case study for Beijing China.» *Ecological Modelling* (Elsevier), no. 220 (2009b).