

ANÁLISIS DE FLUJO DE MATERIALES EN SISTEMAS HUMANOS- UNA REVISIÓN

 JAIME DÍAZ GÓMEZ ¹
JORGE SILVA LEAL ²

RESUMEN

Este artículo es una revisión de los antecedentes históricos y la evolución del concepto de metabolismo de los sistemas humanos, hasta el metabolismo de la antropósfera y su descripción en términos del Análisis de Flujo de Materiales (AFM). Se presentan diferentes experiencias a nivel internacional y nacional que evidencian la aplicabilidad del método. Se muestra cómo el AFM es un método flexible adecuado para la gestión ambiental en diferentes sectores, el cual puede ser empleado para el análisis integral de los problemas ambientales generados por la actividad del hombre y para detectar o estimar los flujos y los stocks de materiales que pueden ser indeseables o potencialmente peligrosos. Esto permite el establecimiento de estrategias eficientes de gestión de flujos de materiales desde el punto de vista de la sostenibilidad, realizando una estimación de los flujos actuales de materiales para anticipar problemas ambientales y emprender acciones tempranas.

PALABRAS CLAVE: análisis de flujo de materiales; sistemas humanos; antropósfera; gestión ambiental; balance de masa.

MATERIAL FLOW ANALYSIS IN HUMAN SYSTEMS- A REVIEW

ABSTRACT

This paper is a review of the historical background and the evolution of the concept of metabolism applied to human systems, till the evaluation of the metabolism of the anthroposphere using the methodology of Material Flow Analysis (MFA). Different international and national experiences that are evidence of the applicability of the method are presented. We show that the MFA is a flexible and suitable tool for environmental management that can be applied as a tool for the comprehensive analysis of the environmental problems generated by human activity. Additionally, the MFA can be used to detect and estimate material flows and stock of material that could be undesirable or potentially dangerous, allowing the establishment of efficient management strategies material flows from the point of view of sustainability and making an estimate of future emissions to anticipate problems and take early action.

KEYWORDS: Material Flow Analysis; Human systems; Anthroposphere; Environmental Management; Mass Balance

¹ Ingeniero sanitario Universidad del Valle. MCs. of Science in Environmental Science and Technology International Institute for Infrastructure, Hydraulic and Environmental Eng. Docente Titular, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Boyacá.

² Ingeniero de producción biotecnológica Universidad Francisco de Paula Santander. Especialización en Ingeniería Sanitaria y Ambiental Universidad del Valle. MCs. en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. PhD en Ingeniería, énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental Universidad del Valle. Docente Asociado, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Boyacá.

 *Autor de correspondencia: Díaz-Gómez, J. (Ilba Geonine).*
Universidad de Boyacá: Carrera 2E N. 64-169, Tunja, Boyacá
Tel: (578) 7450000.
Correo electrónico: jaime.diaz@uniboyaca.edu.co

Historia del artículo:
Artículo recibido: 23-IV-2014 / Aprobado: 24-III-2015
Disponible online: 30 de junio de 2015
Discusión abierta hasta junio de 2016

ANÁLISE DE FLUXO DE MATERIAIS EM SISTEMAS HUMANOS- UMA REVISÃO

RESUMO

Este artigo é uma revisão do contexto histórico da evolução do conceito de metabolismo dos sistemas humanos, até o metabolismo da antroposfera e sua descrição em termos do Análise de Fluxo de Materiais (MFA). São apresentados diferentes experiências a nível internacional e nacional que demonstram a aplicabilidade do método. Mostra-se como o AFM é uma abordagem flexível adequado à gestão ambiental em diferentes setores, que pode ser usado para a análise integral dos problemas ambientais gerados pela atividade do homem para detectar ou estimar os fluxos e estoques de materiais eles podem ser indesejáveis ou potencialmente perigosos. Isso permite o estabelecimento de estratégias eficientes de gestão de fluxo de materiais do ponto de vista da sustentabilidade, fazendo uma estimativa dos fluxos atuais de matérias para antecipar problemas ambientais e tomar medidas mais cedo.

PALAVRAS CHAVE: Análise de Fluxo de Materiais; Sistemas humanos; Antroposfera; Gestão Ambiental; Balanço de Massa.

1. INTRODUCCIÓN

Con el crecimiento de la población y la expansión del poder de la tecnología, la humanidad, se ha convertido en el actor y la fuerza más importante, en el cambio ambiental global (Crutzen, 2002). Esto incluye emisiones de gases de efecto invernadero que causan cambio climático, reducción en la biodiversidad e impactos causados por la extracción de recursos naturales como minerales y combustibles (Pincetl, Bunje, Holmes, 2012).

Este aumento de la población ha sido uno de los eventos más espectaculares y relevantes de la historia de la humanidad, ahora estamos en la actualidad viendo la culminación de un proceso que se ha venido llevando a cabo por siglos (Zehnder, 1994). Una de las principales características del crecimiento de la población, es que se ha incrementado los flujos de energía y materiales necesarios para que las personas lleven a cabo sus actividades; esto produce un nuevo grupo de interacciones entre los seres humanos y el medio ambiente (Redman, 1999).

Una de las consecuencias de la urbanización, es la transformación del hombre en una criatura urbana; a nivel mundial, más personas viven en las zonas urbanas con el 54 % de la población mundial para el año 2014. En 1950, el 30 % de la población mundial era urbana, y en 2050, se espera que el 66 % de la población mundial viva en las ciudades (UN, 2014).

Adicionalmente, la cantidad de alimentos necesarios para satisfacer las necesidades de la

población ha requerido la expansión del área de los suelos destinados para agricultura, lo que representa una de las alteraciones de origen antropogénico más significativas sobre el ambiente global (Tilman, *et al.*, 2011). Entre el año 1700 y 1980, el área cultivada en el mundo se expandió un 466 % (Matson, *et al.*, 1997). De hecho, según Baccini, Kytzia y Oswald (2002), basados en hallazgos arqueológicos y antropológicos, las ciudades son una invención de las sociedades agrarias.

La concentración de personas y su actividad en las ciudades, generan una gran presión sobre el ambiente en la escala regional y global, no solo por la necesidad de alimentos, sino también por la cantidad creciente de materiales y energía empleados para mantener esa actividad, y el estilo de vida contemporáneo (Liddle, Moavenzadeh, 2002). Como una de las principales consecuencias, el flujo total de bienes empleados por el hombre, desde el período neolítico hasta la sociedad urbana altamente estructurada, se ha incrementado en un orden de magnitud (Rechberger, Brunner, 2002). Esto se ve reflejado en la actualidad en áreas densamente pobladas y que los flujos antropogénicos sobrepasan considerablemente los flujos naturales (Brunner, Daxbeck y Baccini, 1994).

El incremento de estos flujos ha ocasionado un problema de tipo cuantitativo, pues cada vez se requiere explotar más materias primas y disponer una mayor cantidad de residuos, lo que ha ocasionado que se deban destinar, una gran cantidad de recursos naturales y financieros (Brunner, Daxbeck y Baccini,

1994). Adicionalmente, se genera un problema de tipo cualitativo, pues se aumenta el almacenamiento y el consumo de materiales contaminados y los flujos que deterioran el medio ambiente (Van der Voet, *et al.*, 1994).

Según Huang y Hsu (2003), para que la urbanización sea sostenible, se debe entender cómo funcionan las ciudades en el contexto del consumo de recursos y la transformación y disposición final de materiales, ya que en forma similar al metabolismo de los organismos vivos, los procesos físicos y biológicos de un sistema urbano transforman los flujos de entrada de materiales y energía, en residuos y en energía degradada (Newman, 1999).

Desde el punto de vista del uso de materiales, la urbanización se convierte en el principal problema cuando está acompañada del estilo de vida de altos ingresos de la sociedad contemporánea. Weisz y Steinberger (2010) sugieren que las ciudades pueden reducir significativamente los flujos de materiales y energía por medio de una configuración y un medio ambiente urbano eficiente. Tal como menciona Rees (1997) este enfoque debe basarse en el comportamiento sostenible de las personas.

Adicionalmente, el enfoque de la sostenibilidad basado en la reducción del uso de recursos a menudo ignora, que una gran parte de la población urbana global, especialmente las naciones más pobres, enfrenta un desafío opuesto el cual es conseguir acceso a una cantidad de materiales y energía suficientes para mantener un nivel de vida decente (Satterthwaite, 2009).

2. METABOLISMO DE LOS SISTEMAS HUMANOS

Carlos Marx fue quien hizo la primera referencia al metabolismo urbano en 1883 y empleó el concepto de metabolismo para describir el intercambio de materiales y energía entre la naturaleza y la sociedad en su crítica de la industrialización (Zhang, 2013). En el año 1920, los sociólogos urbanos de la Universidad de Chicago Robert Park y Ernest Burgess, hicieron referencia al metabolismo biológico aplicado a sistemas urbanos (Lin, *et al.*, 2012). En el año 1925 Burgess publicó un artículo titulado *The Growth of the City: An Introduction to a Research Project* en el que empleó el término de metabolismo urbano sin una definición formal, para hacer una analogía del crecimiento urbano con los procesos

anabólicos y catabólicos del metabolismo (Burgess, 1925). Posteriormente, Abel Wolman desarrolló un modelo de una ciudad Norte Americana hipotética de un millón de habitantes para calcular las entradas de materiales y los residuos generados (Wolman, 1965). Un elemento fundamental en el estudio de Wolman, fue la presentación de la ciudad como un ecosistema inmerso e interactuando con un gran sistema, para describir las interacciones, entre subsistemas en una región urbana (Castán, Allen y Rapoport, 2012).

El metabolismo social se refiere a la manera en la cual las sociedades humanas organizan: su crecimiento, intercambio de energía y materias con el ambiente (Fischer-Kowalski, 1997; Martínez-Alier, *et al.*, 2010). Fischer-Kowalski y Hüttler (1999), describieron los aportes de la biología, ecología, teoría social, antropología cultural y la geografía social entre los años 1860 y 1970, para la aparición de conceptos contemporáneos como metabolismo industrial (Ayres y Knesse, 1969), metabolismo de la antropósfera (Baccini, y Brunner, 1991), y metabolismo urbano (Kennedy, Cuddihy y Engel, 2007).

Los conceptos de metabolismo, aplicados a sistemas humanos emergieron cuando se hizo evidente que la aproximación tradicional, conocida como "Final del Tubo", para la disminución del impacto de los residuos sobre el medio ambiente era insuficiente y había alcanzado su límite (Erkman, 1997; WHO, 1989). Una de las razones es cuando se aborda un problema de contaminación, es que surgen nuevos y más diversos problemas ambientales asociados con la presencia de otros agentes en los residuos (Baccini, Brunner, 1991).

Aunque la aplicación de métodos y tecnología de final del tubo es necesaria y sirve para reducir la contaminación, desde un punto de vista más amplio, es la identificación y reacción tardía a los problemas ambientales generados por la actividad del hombre (Binder, 1996). Por lo anterior, si se desea buscar la sostenibilidad se hace necesario desarrollar herramientas que posibiliten la identificación temprana de los problemas ambientales (Bader y Mosler, 2007), y una mejor comprensión de las consecuencias técnicas, económicas y sociales ocasionadas por la implementación de diferentes estrategias de reducción de la contaminación (Richards, Allenby y Frosh, 1994).

Esto significa un cambio en la forma tradicional

de actuar: de protección ambiental a desarrollo sostenible y manejo regional sostenible. Todo esto implica cambios como: cambio del énfasis en las soluciones de «final del tubo» a control en la fuente, cambio del tratamiento de las fuentes puntuales a gestión ambiental regional y cambio de una gestión administrativa hacia una aplicación de mecanismos legales y económicos (Zhang y Wen, 2008).

3. ANÁLISIS DE FLUJO DE MATERIALES (AFM)

Entre los métodos que emplean los estudios del metabolismo de los sistemas humanos están el AFM, análisis del flujo de energía, y análisis de la huella ecológica (Zhang, 2013).

El AFM de un sistema es un balance de masa de materiales que considera todas las entradas, salidas, flujos internos y stocks. Así mismo, Brunner y Rechberger (2004), definieron el AFM como: «El análisis sistemático de los flujos y almacenamientos de materiales en un sistema determinado en el espacio y el tiempo; en él, se conectan las fuentes, las rutas y los destinos finales de un material». Los sistemas considerados en el AFM, pueden ser la economía doméstica, empresa, regiones, ciudades e inclusive sectores económicos (Hendriks, *et al.*, 2000; Pérez, 2006).

La primera descripción metodológica del AFM como un método para estudiar el metabolismo regional fue realizada en 1991 por Peter Baccini y Paul Brunner (Baccini y Brunner, 1991). La primera aplicación del AFM fue realizada por Baccini, *et al.* (1993), en un estudio llamado Metapolis en el que cuantificaron el consumo, acumulación, y la producción de residuos en la economía doméstica en una ciudad.

En cada economía regional interactúan dos redes de flujo de materiales y energía: la «geogénica» o natural, llevada a cabo por la energía solar, y las interacciones de los ecosistemas regionales, globales y «antropogénicos», conducidas por las actividades biológicas y culturales del hombre (Baccini y Brunner 1991). Los subsistemas antropósfera y medio ambiente, adquieren pasivamente energía solar, agua y minerales de los flujos geogénicos regionales y globales. La antropósfera, adicionalmente, adquiere activamente energía y materiales de fuentes externas (Baccini, Brunner 2012).

El principal objetivo del metabolismo de la antropósfera, es abastecer el proceso de economía doméstica con energía, bienes e información (Baccini y Brunner, 1991), que al ser transformados dentro del sistema, producen residuos y sustancias que pueden ocasionar efectos adversos sobre las personas y el medio ambiente en el que se disponen (Brunner y Rechberger, 2004).

Al describir los sistemas antropogénicos y cuantificar los flujos actuales de materiales y energía, el AFM es un método apropiado para obtener una primera aproximación de la dinámica de las interacciones físicas entre las personas y el medio ambiente, aún en los casos en los que se tiene información escasa y de baja calidad (Binder, 2004). Cuando se combina con el planteamiento de escenarios el AFM, se puede aplicar para identificar los impactos causados por los cambios en los flujos antropogénicos (Binder, *et al.*, 2001) y para evaluar la implementación de políticas (Tangsubkul, *et al.*, 2005) así como, para la toma de decisiones (Haque, Mujtaba y Bell. 2000; Van der Voet, 1996).

Los flujos de materiales o de sustancias en sistemas humano-ambientales, se pueden simular con modelos matemáticos para condiciones estáticas (Andenberg, *et al.*, 1993; Bauer, *et al.*, 1997; Bringezu, *et al.*, 1997; Hug y Baccini, 2002), así como para condiciones dinámicas (Park, *et al.*, 2011; Schmid Naset, *et al.*, 2006; Schmid Naset, *et al.*, 2008; Bader, Scheidegger y Wittmer 2011; Hug, *et al.*, 2004). Para esta última condición, su aplicación fue demostrada por Binder, *et al.*, (2001) para el análisis dinámico del flujo de bienes duraderos en la Ciudad de Tunja (Colombia) y Pfister, *et al.*, (2005), en sistemas agrícolas en Nicaragua. La principal diferencia entre los modelos estáticos y dinámicos de AFM, radica en la inclusión en estos últimos la acumulación de materiales o reservorios en los procesos (Van der Voet, *et al.*, 2002).

La metodología del AFM, es también una herramienta para el manejo integrado de los recursos y residuos de un país o una región, ya que permite obtener información acerca de su cantidad, calidad, efecto sobre el ambiente, y para el diseño y evaluación de las tecnologías para su tratamiento (Gregory, Nadeau y Kirchain, 2009). Adicionalmente, se puede orientar hacia un análisis que posibilite la minimización del flujo de residuos de la antropósfera al medio ambiente (Brunner, Daxbeck, Baccini, 1994).

También, de acuerdo con el crecimiento del sistema urbano, el AFM se puede emplear para identificar los requerimientos actuales y futuros de bienes y energía de una comunidad (Hendriks, *et al.*, 2000).

4. DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DEL AFM

El punto de partida de todos los métodos de análisis de flujo de materiales y energía, son los principios de la ley de la conservación de la energía expresados en la primera ley y de alguna manera, en la segunda ley de la termodinámica (Schiller, 2009). La ley de la conservación de la masa permite formular una ecuación de balance de masa para cada proceso del sistema en la que *masa entrando=masa saliendo+ cambio en la acumulación* (Pincetl, Bunje y Holmes, 2012).

Con relación a la segunda ley de la termodinámica, también conocida como «Ley de la Entropía» esta describe el cambio en la calidad de la energía (Liao, *et al.*, 2012). Estas leyes dan las bases para la cuantificación física de las interacciones entre los ecosistemas y sus alrededores (Weston y Ruth, 1997), y son ampliamente reconocidas, como una aproximación fundamental para la modelación de sistemas en varios niveles (Liao, Heijungs y Huppes, 2012). Estos sistemas, pueden ser organismos, la ecósfera o sistemas humanos tales como la ciudad, un proceso productivo, o toda la economía.

En un AFM para cada proceso se define el cambio en la acumulación como igual a la suma de los flujos de masa de entrada menos la suma de los flujos de masa de salida según la **Ecuación 1** (Montangero y Belevi, 2007).

$$\frac{dM_i^{(j)}}{dt} = \sum_r A_{i,r-j} - \sum_s A_{i,j-s} \tag{1}$$

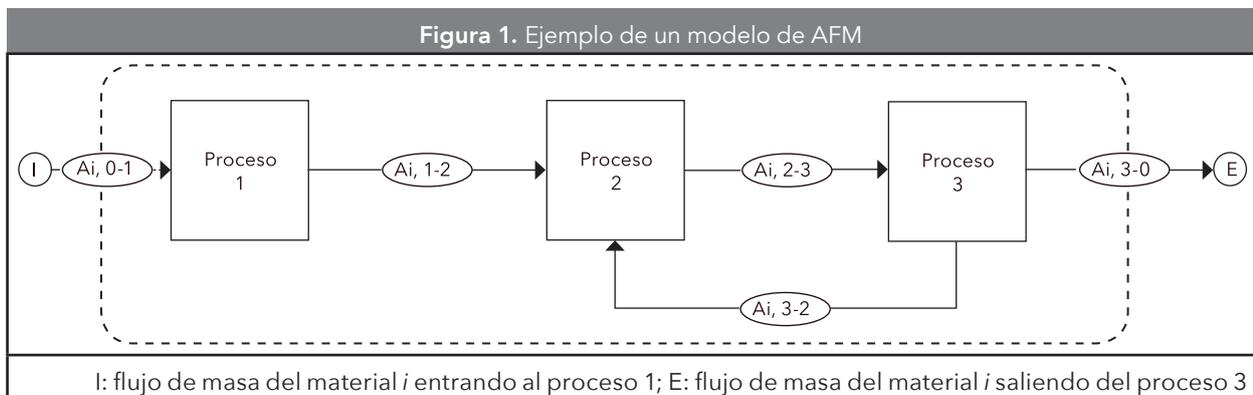
En la que *i* corresponde a la sustancia indicadora, *j* es el número de proceso, $M_i^{(j)}$ la masa de la sustancia *i* en el proceso *j*, *t* el tiempo, *r* el proceso de origen, *s* el proceso de destino, $A_{i,r-j}$ el flujo de entrada de la sustancia *i* desde el proceso de origen *r* al proceso de destino *j*, $A_{i,j-s}$ flujo de salida de la sustancia *i* desde el proceso *j* al proceso de destino *s*. El lado izquierdo de la expresión indica el cambio en el tiempo de la masa de la sustancia *i* en el proceso *j*. Si la sustancia *i* no es un elemento químico inerte, sino un compuesto susceptible de transformación, se debe incluir en la parte derecha de la expresión el término de la producción. La **Figura 1** presenta una descripción de un modelo de AFM.

Por ejemplo, para la figura anterior y de acuerdo con la **Ecuación 2**, el balance de masa del constituyente *i* en el proceso 2 es:

$$\frac{dM_i^{(2)}}{dt} = A_{i,1-2} + A_{i,3-2} - A_{i,2-3} \tag{2}$$

En el caso de las ciudades, pueden ser consideradas sistemas abiertos complejos, los cuales se mantienen lejos del equilibrio por los flujos de energía y materia que fluyen a través de sus límites y que tienen origen en los sistemas localizados en sus alrededores (Schneider y Kay, 1994). El sistema abierto ciudad-región procesa flujos de energía y materiales y descarga materiales y energía de baja calidad exportando entropía (Browne, O’ Regan y Moles, 2011). Por lo tanto, la ciudad puede mantenerse y crecer gracias a la importación de materiales y energía de alta calidad extraídos del medio ambiente circundante y exportando hacia ese medio ambiente, alta entropía, equivalente a materiales y energía degradados (Rees, 1997).

Este tipo de sistemas, que mantiene su forma y



estructura, por una degradación y disipación continua de energía y materia son conocidos como «estructuras disipativas» (Prigogine, 1997).

Una implicación de lo anterior, es que en la atmósfera se pueden gestionar los residuos producidos, pero se requerirá energía para retornarlos al sistema en una forma útil. Aun así, todos los materiales serán algún día residuos. Un ejemplo, son todos los productos orgánicos, los cuales son convertidos en CO₂ y por lo tanto no se pueden reciclar, a menos que se use una enorme cantidad de energía. Esto es conocido, como el factor entropía en el metabolismo (Newman, 1999).

Como lo plantean Von Weiszäcker y Ayres (2013), no existe ninguna máquina de movimiento perpetuo, todos los procesos industriales o domésticos que emplean recursos y energía para producir productos, inevitablemente generan residuos y contaminación; el reciclaje 100 % y las cero emisiones son posibles solo localmente y a expensas de más contaminación en otro sistema. Por lo tanto, la mejor estrategia para reducir la contaminación es usar los flujos de materiales y energía más eficientemente.

5. TIPOS DE AFM

Según Bringezu y Moriguchi (2002), el AFM, está basado conceptualmente en dos aproximaciones. Estas son: detoxificación y desmaterialización del metabolismo industrial. La primera se refiere a la reducción de las emisiones de sustancias críticas para el medio ambiente mediante la reducción de la contaminación y la segunda hace referencia a un incremento en la eficiencia y reducción en el uso de los recursos.

Bringezu y Moriguchi (2002), clasificaron el AFM en 2 tipos generales I y II. El AFM, se refiere generalmente a los análisis tipo I incluyendo flujo de sustancias, caso en el que se conoce como Análisis de Flujo de Sustancias (SFA, por sus siglas en inglés) y flujo de materiales como madera, biomasa y plásticos. En el caso del tipo II, el AFM aplica para el análisis de problemas ambientales relevantes relacionados con el flujo de sustancias, materiales y productos a través de sectores productivos, regiones e inclusive países. En este caso, se conoce comúnmente como contabilidad del flujo de materiales y se caracteriza por que generalmente se implementa en escalas regionales y nacionales (Browne,

et al., 2009). Cuando el AFM se emplea para el análisis de problemas ambientales específicos, relacionados con un cierto impacto por unidad de flujo de productos, en empresas y regiones, se considera que es un estudio de Evaluación del Ciclo de Vida (ECV) (Bringezu y Moriguchi, 2002).

El AFM referido a la extensión que se conoce como modelación matemática del análisis del flujo de materiales (Baccini y Bader, 1996), se caracterizan por que generalmente, incluye los siguientes pasos: (1) análisis del sistema, (2) definición del modelo, (3) adquisición de la información y (4) simulación con análisis de sensibilidad e incertidumbre (Huang, *et al.*, 2007).

6. APLICACIONES DEL AFM

El AFM puede ser usado como un instrumento para: *i)* evaluar los efectos de procesos y bienes en los flujos de materiales y *ii)* controlar los flujos de materiales con el fin de minimizar los impactos ambientales, así como economizar energía y materiales para un determinado grupo de actividades (Brunner y Rechberger, 2004). Aunque en la mayoría de los casos, las aplicaciones del AFM se han dado en el estudio de los flujos de materiales y energía en sistemas ambientales, el método puede ser empleado fácilmente en otros tipos de sistemas (Scholz y Tietje, 2002).

La aplicación del AFM ha sido ampliamente demostrada en países desarrollados. Kneese, *et al.* (1974) en los Estados Unidos, hicieron un primer intento por describir y cuantificar los flujos de masa. Ayres y Kneese (1969), presentaron un extenso ensayo acerca de las rutas de los materiales a través del sistema económico y Bergbäck, Johansson, y Mohlander, (1992) en Suecia lo emplearon para describir el patrón de uso del plomo entre los años 1880-1980. Se puede decir que estos primeros trabajos, son el origen de los métodos conocidos como AFS (Análisis del Flujo de Sustancias) y AFM (Van der Voet, 1996). Schwarzenbach y Scholz (1999), efectuaron una evaluación sistemática con AFM de los flujos de contaminantes y materiales resultantes de la remediación de sitios contaminados en la ciudad de Zurich.

Montangero y Belevi (2007) y Montangero, *et al.* (2007), en Hanoi (Vietnam), evaluaron el impacto de los cambios de las prácticas agrícolas y de saneamiento en

la extracción de aguas subterráneas y la posible recuperación de fósforo en la zona urbana periférica. También Schaffner, Bader, y Scheidegger (2009), emplearon el AFM en el Río Thachin (Tailandia), para cuantificar y modelar los flujos de nutrientes causados por fuentes puntuales y distribuidas y determinar la efectividad de las medidas de mitigación. En estos casos, los problemas con la aplicación del AFM, se concentran en la escasa disponibilidad y calidad de la información y los escasos recursos para su obtención (Montangero, *et al.*, 2007), lo que aumenta la incertidumbre en la información empleada y los resultados de los modelos de AFM.

La primera aplicación del AFM, en una ciudad de un país en vía de desarrollo, se realizó en la ciudad de Tunja (Colombia) por Binder (1996), para estudiar la posibilidad de aplicar la metodología para la identificación temprana de problemas ambientales y la evaluación del uso sostenible de los recursos hídricos. En este proyecto se concluyó que es posible emplear el método cuando se tiene información escasa y de pobre calidad y se identificaron estrategias de monitoreo para evaluar los flujos de materiales así como su impacto y mitigación.

Pfister y Baccini (2005), Pfister, *et al.*, (2005). Binder y Mosler (2007), emplearon el AFM en Cuba para analizar los flujos de masa de consumo y residuos de bienes de vida corta y plantearon una primera aproximación hacia la gestión de los residuos. Piña y Pardo (2013), emplearon el AFM para determinar los flujos de entrada de agua, bienes y alimentos y las salidas de aguas residuales, contaminantes atmosféricas y residuos en la ciudad de Bogotá (Colombia) para determinar la relación entre la demanda de recursos y el impacto ambiental de las salidas.

7. AFM EN SISTEMAS INDUSTRIALES

El AFM puede ser empleado también para industrias y zonas industriales. Sin embargo en esta última produce resultados diferentes (Binder, 2007a). En las industrias, los resultados del AFM han sido muy exitosos en la optimización de los flujos de materiales en y de procesos de producción. Sin embargo, cuando el AFM se emplea en parques industriales, es necesario realizar algunas adaptaciones (Sendra, Gabarrell, Vicent, 2007).

Estas adaptaciones son: el AFM debe ser combinado con análisis de flujo de energía y se deben medir

todos los recursos usados en el sistema; mientras en el nivel nacional la mayoría de la información es estadística, en parques industriales deben ser suministrados por la industria; se debe evaluar el nivel de desmaterialización, en lugar de un indicador como el producto nacional bruto, que generalmente se emplea en el nivel nacional o regional. Con los resultados obtenidos se pueden obtener indicadores basados en el AFM que sirven para detectar oportunidades en la optimización de los flujos de materiales.

8. EL AFM COMO HERRAMIENTA DE DISEÑO URBANO Y LA ENSEÑANZA

El concepto del AFM como una herramienta para el diseño urbano es un desarrollo relativamente reciente (Kennedy, Pincetl, Bunje 2011). Los primeros intentos buscando ir desde el análisis hasta el diseño se deben a Oswald y Baccini (1998), quienes en *Netzstadt (Network-City o Web City)* demostraron como una combinación de herramientas morfológicas y fisiológicas pueden ser empleadas en el largo proceso para la reconstrucción de la ciudad.

En la experiencia descrita por Kennedy, Pincetl, y Bunje, (2011), los estudiantes de ingeniería civil de la Universidad de Toronto, emplearon el concepto de metabolismo urbano para diseñar la infraestructura de las ciudades sostenibles, describiendo los desafíos que se encuentran en la escala de los vecindarios y aplicando el concepto de metabolismo del vecindario (Berg y Nycander, 1997).

En estas experiencias los estudiantes, usaron las mejores prácticas ambientales para el diseño de edificios, un transporte sostenible y sistemas de energía alternativa trazando, en sus proyectos, los flujos de agua, energía, nutrientes y materiales a través de un sistema urbano, diseñado para cerrar los ciclos reduciendo la entrada de recursos y la salida de residuos. El resultado de algunos de estos proyectos, muestra lo cerca que se puede llegar a un diseño urbano esencialmente sostenible. El agua gris, se usa para las unidades sanitarias y regadío de jardines; el lodo del tratamiento de las aguas, se emplea en jardines comunitarios para producción de alimentos; la energía importada a partir de los residuos municipales no solamente se emplea en los edificios, sino también para transporte y el exceso

vuelve a la red. La ceniza de la planta de gasificación, se recicla como material de construcción. Por el cierre parcial de estos ciclos, los flujos de energía, agua, materiales y nutrientes son reducidos significativamente.

En la Universidad de Boyacá, la aplicación del AFM se inició en el año 1992, con marco en un proyecto de investigación con el Instituto Federal Suizo de Tecnología (ETH) apoyado por la Fundación Suiza para la Ciencia (SNF, por sus siglas en inglés) para determinar si el método era aplicable en un país en vía de desarrollo en forma similar a las aplicaciones ya implementadas en países desarrollados (Binder, *et al.*, 1997). Para este caso se realizaron mediciones de campo, aplicación del AFM, discusión de los resultados y socialización de los resultados, encontrando que aún en condiciones en las que la información es escasa y de baja calidad el método puede ser empleado para identificar problemas ambientales y plantear escenarios para la gestión sostenible de los flujos regionales de materiales (Binder, 2002).

9. COMBINACIÓN DEL AFM CON OTRAS HERRAMIENTAS DE LA ECOLOGÍA INDUSTRIAL

Como lo menciona Scholz (2011), dos de las metodologías más importantes de la ecología industrial, son el AFM y la ECV. Brunner y Rechberger (2004), sugirieron la necesidad de incluir la evaluación del impacto ambiental en el AFM, lo que puede ser realizado combinándolo con ECV (Björklund, *et al.*, 1999; Kuo Hsiao y Lan, 2003; Sonesson y Berlin 2002; Jeppson y Hellström, 2002). Esta unión, resulta ventajosa pues se obtiene una buena comprensión del sistema y sus flujos con AFM, y una información consistente relacionada con los impactos ambientales de diferentes escenarios con ECV.

Esta combinación, fue empleada por Venkatesh, Hammervold y Brattebø (2009), para estimar los flujos futuros y los impactos ambientales de los materiales de tuberías. Adicionalmente, Chen, Ngo y Guo, (2012) evaluaron sistemas de reciclaje de aguas residuales y Yu, Williams y Ju (2010), estudiaron los flujos de materiales y los impactos ambientales asociados con la telefonía celular en China. Sin embargo, ninguno de ellos presentó formalmente la forma para combinar los métodos, ni la unidad funcional empleada.

Cherubini, Bargigli, y Ulgiati (2009), especifica-

ron claramente la unidad funcional para la ECV, pero los resultados no se presentaron en unión con el AFM. Wager, *et al.* (2011) también combinaron el AFM y la ECV para el análisis de los residuos eléctricos y electrónicos de Suiza sin la presentación de una metodología consistente para combinar los métodos y obtener una ponderación con la ECV.

Jeswani, *et al.* (2010), manifestaron que la combinación del AFM con ECV incluye varios desafíos como la definición de los límites del sistema y las reglas de asignación. En el campo de gestión de los residuos el AFM y la ECV empleados separadamente (Subramanian, 2000) o combinados (Assefa, *et al.*, 2005), se han enfocado en flujos de materiales e impactos ambientales, excluyendo otros criterios de evaluación con dimensiones sociales y económicas. Esta última consideración fue tenida en cuenta por Streicher-Porte, *et al.* (2009) quienes evaluaron en Colombia una combinación de AFM, ECV y Teoría de Utilidad de Múltiples Atributos (MAUT) para evaluar la sostenibilidad del uso de Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC's) en instituciones educativas y Roachat, *et al.* (2013) quienes presentaron la metodología para la unión de AFM, ECV y MAUT con el fin de evaluar diferentes escenarios para la disposición final del Tereftalato de Polietileno (PET) en la ciudad de Tunja (Colombia).

En otras combinaciones del AFM con otras herramientas, Jang, *et al.* (2012) emplearon una combinación entre AFM y Evaluación del Riesgo para Personas (HRA, por sus siglas en inglés) con el fin de evaluar el riesgo por los flujos de mercurio en diferentes poblaciones de Korea.

10. PRINCIPALES DIFICULTADES EN LA APLICACIÓN DEL MÉTODO

Aunque el AFM ha demostrado ser una herramienta muy útil los legisladores rara vez la incluyen en la toma de decisiones a nivel regional. Binder (2007a), expresa que las principales razones para la no inclusión son primero metodológicas, y segundo la dificultad para aplicar directamente los resultados. El primer aspecto lo discrimina mencionando que no hay un marco general metodológico, hay poca disponibilidad de la información, alta incertidumbre en la información y hay una necesidad de mejorar la estructura para la

interpretación de los resultados. Todo esto implica que los objetivos de la gestión de los materiales deben ser claramente definidos por medio de criterios normativos. Adicionalmente, Chen, *et al.* (2012) y Goldstein, *et al.* (2013) mencionan que el AFM solo puede ser empleado con la masa de una sustancia para evaluar su intervención sobre el ambiente en un área específica, por lo que los efectos laterales de otras sustancias están fuera del objetivo del análisis. Por lo tanto, existe el riesgo de pasar por alto un problema crítico si se comete un error al seleccionar el material para el análisis.

Por estas razones la investigación y la implementación de la metodología que se realiza en estos días, está dirigida a reducir estas dificultades combinando el AFM con metodologías como la EVC (Venkatesh, Hamervold y Brattembø, 2009; Rochat, *et al.*, 2014)

11. CONCLUSIONES

El análisis de flujo de materiales- AFM es un instrumento flexible y adecuado para la gestión ambiental ya que puede ser empleado como una herramienta para el análisis integral de los problemas ambientales generados por la actividad del hombre permitiendo observar las características de los flujos de materiales en las entradas y salidas, así como su interacción con los diferentes procesos que se llevan a cabo en el sistema evaluado. Adicionalmente, el AFM sirve como un elemento de análisis a nivel regional para identificar las medidas más efectivas para el control del flujo de materiales en una región y las determinaciones que se pueden implementar como políticas de planeación.

El AFM también puede ser empleado para detectar y estimar flujos de materiales y reservorios que pueden ser indeseables o potencialmente peligrosos. Aplicando el AFM para la identificación de estos flujos, se establecen prioridades, se diseñan las estrategias eficientes de gestión de flujos de materiales desde el punto de vista de la sostenibilidad y se estiman los flujos de magnitud desconocida. Adicionalmente, estas estimaciones son un elemento definitivo de las políticas ambientales ya que permite una estimación de las emisiones futuras para anticipar problemas y emprender acciones tempranas, así mismo, ofrecen un potencial adicional para identificar los flujos y stocks de materiales que significarán un riesgo potencial.

Las experiencias internacionales y nacionales evidencian la utilidad de esta metodología para la evaluación de diferentes tipos de problemas ambientales relacionados con el flujo antropogénico de materiales, destacándose el potencial de su aplicación a nivel nacional.

Las debilidades del método han sido identificadas por varios autores por lo que en la actualidad la metodología que ha sido reconocida como el método original para evaluar el metabolismo urbano se combina con métodos como la Evaluación del Ciclo de Vida (ECV) para emplear los resultados en la evaluación del impacto de los flujos antropogénicos sobre el ambiente.

REFERENCIAS

- Andenberg, S. (1998). Industrial Metabolism and the Linkages Between Economics, Ethics and the Environment. *Ecological Economics*, 24, pp. 311-320.
- Andenberg, S.; Bauer, G.; Ermoliev, Y.; Stigliani, W. (1993). Mathematical Tools for Studies of Industrial Metabolism. IIASA Working Paper WP-93-9, Laxenburg, Austria, 28 pp.
- Assefa, G., A.; Björklund, O.; Eriksson, B.; Frostell. (2005). ORWARE: An Aid to Environmental Technology Chain Assessment. *Journal of Cleaner Production*, 13(3), pp. 265-274.
- Ayres, R.U.; Kneese, A. V. (1969). Production, Consumption, and Externalities. *American Economic Review*, 59, pp. 282-297.
- Baccini, P.; Brunner, P. (2012). Metabolism of the Anthroposphere. New York, 2th Edition, MIT Press. p.3.
- Baccini, P.; Brunner, P. (1991). Metabolism of the Anthroposphere. New York, Springer, pp. 11-113.
- Baccini, P.; Daxbeck, H.; Glenck, E.; Henseler, G. (1993). METAPOLIS: Güter- und Stoffumsätze in den privathaushalten einer stadt (Zurich, Nat. Forschungsprogramm 25 "Stad und Verkehr", 34 A+ 34 B).
- Baccini, P.; Bader, H.-P. (1996), Regionaler Stoffhaushalt, Erfassung, Bewertung und Steuerung (Heidelberg, Spektrum Akademischer Verlag), pp. 420.
- Baccini, P. (1996). Understanding Regional Metabolism for a Sustainable Development of Urban Systems. *Environmental Science and Pollution Research*, 3(2), pp. 108-111.

- Baccini, P.; Kytzia and Oswald F. (2002). Restructuring Urban Systems En: Future Cities: Dynamics and Sustainability, pp. 17-43.
- Bader, H-P.; Scheidegger, R.; Wittmer, D. (2011). Copper Flows in Buildings, Infrastructure and Mobiles: a Dynamic Model and its Application to Switzerland. *Clean Technology Environmental Policy*, 13, pp. 87-101.
- Bader, P.-H., and Mosler, J. (2007). Material Flows: from Analysis to Management. *EAWAG News* 62E, pp. 4-8.
- Bauer, G., Deistler, M., Gleiß, A., Glenck, E., and Matyus, T. (1997). Identification of Material Flow Systems. *Environmental Science and Pollution Research*, 4 (2), pp. 105-112.
- Berg, D., and Nycander, G. (1997). Sustainable NeighbourHoods- A Qualitative Model for Resource Management in Communities. *Landscape and Urban Planning*, 39, pp. 117-135.
- Bergbäck, B., Johansson, K., and Mohlander, U. (1992). Urban Metal Flows-A Case Study of Stokholm-Review and Conclusions. *Water Air and Soil Pollution: Focus*, 1, pp. 3-24
- Binder C. (1996).The Early Recognition of Environmental Impacts of Human Activities in Developing Countries. Ph.D. Dissertation 11487. Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology Zurich.
- Binder C, Schertenleib R, Diaz J, and Baccini P. (1997). Regional Water Balance as a Tool for Water Management in Developing Countries. *Water Resources Development*, 13 (1), pp. 5-20.
- Binder C, Bader H-P, Scheidegger R., and Baccini P. (2001). DynamicModels for Managing Durables Using a StratiFied Approach: The Case of Tunja, Colombia. *Ecological Economics*. 38 (2), pp.191-207.
- Binder, C. (2002). Research Partnership with Developing Countries: Application of the Methods of Material Flow Analysis in Tunja, Colombia. En: Future Cities: Dynamics and Sustainability. Moavenzadeh F, Hanaki K & Baccini P Eds. Kluwer Academic, Dordrecht, pp. 227-240.
- Binder, C. (2004). Modeling Dynamics of Resource Use in Human-Environment Systems.A Habilitation Thesis in Human-Environment Systems. Institute for Human Environment Systems. Swiss Federal Institute of Technology-ETH.
- Binder, C., and Mosler, H, J. (2007). Waste-Resource Flows of Short-Lived Goods in Households of Santiago de Cuba. *Resources Conservation and Recycling*, 51, pp. 265-283.
- Binder, C. (2007a). From Material Flow Analysis to Material Flow Management Part I: Social Sciences Modeling Approaches Coupled to MFA. *Journal of Cleaner Production*. 15, (17), pp. 1596-1604.
- Binder, C. (2007b). From Material flow analysis to material flow management Part II: the role of structural agent analysis. *Journal of Cleaner Production*, 15 (17), pp. 1605-1617.
- Björklund, A., Bjuggren, C., Dalemo, M., and Sonesson, U. (1999). Planning Biodegradable Waste Management in Stockholm. *Journal of Industrial Ecology*, 3 (4), pp. 43-58.
- Bringezu, S. and Moriguchi, Y. (2002). Material Flow Analysis. En: A Handbook of Industrial Ecology, Ayres R U and Ayres L W Eds. Cheltenham UK: Edward Elgar, pp. 80-81.
- Browne, D., O' Regan, B. and Moles, R. (2011). Assessment of Total Urban Metabolism and Metabolic Inefficiency in an Irish City-Region. *Waste Management*, 29, pp. 2765-2771.
- Brunner, P, H. and Rechberger H. (2004). Practical Handbook of Material Flow Analysis. NY, USA: Lewis Publishers, pp. 1-53.
- Brunner, P.H. and Baccini, P. (1992). Regional Material Management and Environmental Protection. *Waste Management and Research*, 10, pp. 203 - 212.
- Brunner . P., Daxbeck. H. and Baccini, P. (1994). Industrial Metabolism at the Regional and Local Level: A Case Study on a Swiss Region. En: Industrial Metabolism, Restructuring for Sustainable Development, Ed. by Robert, U. Ayres and, Simonis U. 163- 193. Tokyo. United Nation University Press, pp. 163- 193.
- Burgess, E, W. (1925). The Growth of the City: An introduction to a Research Project. Urban Ecology. Marzluff et al. Eds. Springer: Boston (MA), pp. 71-78.
- Castán Broto, V., Allen, A., and Rapoport, E. (2012). Interdisciplinary Perspectives on Urban Metabolism. *Journal of Industrial Ecology*, 16 (6), pp. 851-861.
- Crutzen, J. P. (2002). Geology of humankind. *Nature*, 416, p. 23.
- Chen, Z., Ngo, H. H. and Guo, W. (2012). A Critical Review on Sustainability Assessment of Recycled Water Schemes. *Science of the Total Environment*, 456, pp. 13-31.

- Cherubini, F., S. Bargigli, and Ulgiati, S. (2009). Life Cycle Assessment (LCA) of Waste Management Strategies: Landfilling, Sorting Plant and Incineration. *Energy*, 34 (12), 2116–2123.
- Erkman, S. (1997). Industrial Ecology: An Historical View. *Journal of Cleaner Production*, 5 (1-2), pp. 1-10
- Fischer-Kowalski, M. (1997). Society's Metabolism: on the Childhood and Adolescence of a Rising Conceptual Star. Redclift, M., Woodgate, G., The International Handbook of Environmental Sociology. Edward Elgar, Cheltenham, In. pp. 119–37.
- Fisher-Kowalsky, M. and Hüttler, W. (1999). Society's Metabolism- The Intellectual History of Material Flow Analysis, Part II, 1970-1998. *Journal of Industrial Ecology*, 2 (4), 107-136.
- Goldstein, B., Birkved, M., Quitzau, M-J. and Huschild, M. (2013). Quantification of Urban Metabolism Through Coupling with Life Cycle Assessment Framework: Concept Development and Case Study. *Environmental Research Letters*, 8, pp. 1-14.
- Gregory, J, R., Nadeau, M, C. and Kirchain, R, E. (2009). Evaluating the Economic Viability of a Material Recovery System: The Case of Cathode Ray Tube Glass. *Environmental Science and Technology*, 43, pp. 9245-9251.
- Haque, A., Mujtaba, I, M. and Bell, J, N, B. (2000). A Simple Model for Complex Waste Recycling Scenarios in Developing Economies. *Waste Management*, 20, pp. 625–631.
- Hendriks, C., Obernosterer, R., Müller, D., Kytzia, S., Baccini, P. and Brunner, P. (2000). Material Flow Analysis: A Tool to Support Environmental Policy Decision Making. Case Studies on the City of Vienna and the Swisslowlands. *Local Environment*, 5 (3), pp. 311-328.
- Huang, S-L. and Hsu, W-L. (2003). Materials Flow Analysis and Emergy Evaluation of Taipei's Urban Construction. *Landscape and Urban Planning*, 63, pp. 61-74.
- Huang, D, B., Bader, H-P., Scheidegger, R., Schertenleib, R. and Gujer, W. (2007). Confronting Limitations: New Solutions Required for Urban Water Management in Kuming City. *Journal of Environmental Management*, 84, pp. 49-61.
- Hug, F. and Baccini, P. (2002). Physiological Interactions between highland and lowland regions in the context of long-term resource management. *Mountain Research and Development*, 22 (2), pp. 168-176.
- Hug, F., Bader, H-P, Scheidegger, R. and Baccini, P. (2004). A Dynamic Model to Illustrate the Development of an Interregional Energy Household to a Sustainable Status. *Clean Technology Environmental Policy*, 6, pp. 138-148.
- Jang, E., Kyoung-ryun, K., Kyung-hwan, K. and Hur, T. (2012). Material Flow Analysis and Human Risk Assessment of Mercury. Design for Innovative Value Towards a Sustainable Society. M. Matsumoto (Ed). Springer Science, pp. 888-890.
- Jeppson, U., and Hellström, D. (2002). Systems Analysis for Environmental Assessment of Urban Water and Wastewater Systems. *Water Science and Technology*, 46 (6-7), pp. 121-129.
- Jeswani, H. K., A. Azapagic, P. Schepelmann. and Ritthoff, M. (2010). Options for Broadening and Deepening the LCA Approaches. *Journal of Cleaner Production*, 18(2), pp. 120–127.
- Kennedy, C. A., Cuddihy, J., and Engel Yang, J. (2007). The Changing Metabolism of Cities. *Journal of Industrial Ecology*, 11, pp. 43-59.
- Kennedy, C., Pincetl, S. and Bunje, P. (2011). The study of Urban Metabolism and its Application to Urban Planning and Design. *Environmental Pollution*, 159, pp. 1965-1973.
- Kneese, A, V., Ayres, R, U. and D' Arge, R, C. (1974). Economics and the Environment. A Material Balance Approach. John Hopkins University Press, Baltimore, USA, 120 p.
- Kuo, N.-W., T.-Y. Hsiao. and C.-F. Lan. (2003). Tourism Management and Industrial Ecology: A Case Study of Food Service in Taiwan. *Tourism Management*, 26 (4), pp. 503–508.
- Liao, W., Heijungs, R. and Huppes, G. (2012). Thermodynamics Analysis of Human-Environment Systems: A Review Focused on Industrial Ecology. *Ecological Modelling*, 228, pp. 76-88.
- Liu, Y., Villalba, G., Ayres, R, U. and Schroeder, H. (2008). Global Phosphorus flows and Environment Impacts from a Consumption Perspective. *Journal of Industrial Ecology*, 12, pp. 229-247.
- Liddle, B. and Moavenzadeh, F. (2002). Cities: Challenges and Opportunities for Sustainability. En: Future Cities: Dynamics and Sustainability. Moavenzadeh, F., Hanaki, K., Baccini, P. Kluwer Academic: Dordrecht, pp. 1-15.
- Lin, L., Liu, M., Luo, F., Wang, K., Zhang, Q., and Xiang, W-N.

- (2012). Comment on "The Study of Urban Metabolism and its Applications to Urban Planning and Design" by Kennedy, *et al.* (2011). *Environmental Pollution*, 167, pp. 184-185.
- Matson, P. A., Parton, W. J., Power, A. G. and Swift. (1997). Agricultural Intensification and Ecosystems Properties. *Science*, 27, pp. 504-509.
- Martinez-Alier, J., Kallis, G. Veuthey, S., Walter, M. y Temper, L. (2010). Social Metabolism, Ecological Distribution Conflicts, and Valuation Languages. *Ecological Economics*, 70, pp. 153-158
- Montangero, A. and Belevi, H. (2007). Assessing Nutrient Flows in Septik Tanks by Eliciting Expert Judgement: A Promising Method in the Context of Developing countries. *Water Research*, 41, pp.1052-1064.
- Montangero, A., Cau, L, N., Viet Anh, N., Tuan, V, D., Nga, P, T., and Believe, H. (2007). Optimizing Water and Phosphorus Management in the Urban Environmental Sanitation System of Hanoi, Vietnam. *Science of the Total Environment*, 384, pp. 55-66.
- Newman, P. W. G. (1999). Sustainability and Cities: Extending the Metabolism Model. *Land Scape and Urban Planning*, 44, pp. 219-226.
- Oswald, F. and Baccini, P. (1998). *Netzstadt: Designing the Urban*. Birkhäuser, pp. 11-29.
- Park, J-a., Seok- jin., H., Kim, Ik., Lee, J-y. and Hur T. (2011). Dynamic material flow analysis of steel resources in Korea. *Resources, Conservation and Recycling*, 55, pp. 456-462.
- Pérez, M. A. (2006). Colombian international trade from a physical perspective: Towards an ecological "Prebisch thesis". *Ecological Economics*, 59, pp. 519-529.
- Pfister, F., Bader, H.-P., Scheidegger, R. and Baccini, P. (2005). Dynamic modeling of resource management for farming systems. *Agricultural Systems*, 86, pp. 1-28.
- Pfister, F. and Baccini, P. (2005). Resource potentials and limitations of a Nicaraguan agricultural region. *Environment, Development and Sustainability*, 7, pp. 337-361.
- Pincetl, S., Bunje, P. and Holmes, T. (2012). An expanded urban metabolism method: toward a system approach for assessing urban energy processes and causes. *Landscape and Urban Environment*, 107, pp. 193-202.
- Piña, W, H., and Pardo, C, I. (2013). Urban material flow analysis: An approach for Bogotá, Colombia. *Ecological Indicators*, [Online] Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.10.035>. [Consultado 21 de abril de 2014].
- Prigogine, I. (1997). *The end of certainty: time, chaos and the new laws of nature*. The Free Press, New York, p. 45.
- Qiao, M., Zheng, Y, M., and Zhu, Y, G. (2011). Material Flow Analysis of Phosphorus Through Food Consumption in Two Megacities in Northern China. *Chemosphere*, 84(6), pp. 773-778.
- Rechberger, H. and Brunner, P. (2002). A New, Entropy Based Method to Support Waste and Resource Management Decisions. *Environmental Science and Technology*, 36, pp. 809-816.
- Rees, W. E. (1997). Is "Sustainable City" an Oxymoron?. *Local Environment*, 2(3), pp. 303-310.
- Richards, D., Allenby, B., and Frosh, R, A. (1994). The Greening of Industrial Ecosystems: Overview and Perspective. En: *The Greening of Industrial Ecosystems*, pp. 1-19. Washington D.C, National Academic Press.
- Rochat, D., Binder, C., Diaz, J., and Jolliet, O (2013). Assessment of End-of-Life Scenarios for PET in Tunja, Colombia, Using Material Flow Analysis (MFA), Life Cycle Assessment (LCA) and Multi-Attribute Utility Theory (MAUT). *Journal of Industrial Ecology*, 17(5), pp. 633-792.
- Satterthwaite, D. (2009). The Implications of Population Growth and Urbanization for Climate Change. *Environment and Urbanization*, 21(2), pp. 545-567.
- Schaffner, M., Bader, H-P. and Scheidegger, R. (2009). Modeling the Contribution of Point Sources and non-Point Sources to Thachin River Water Pollution. *Science of the Total Environment*, 407, pp. 4902-4915.
- Schneider, E. D., and Kay, J. J. (1994). Life a Manifestation of the Second Law of Thermodynamics. *Mathematical and Computer Modelling*, 19(6-8), pp. 25-48.
- Schiller, F. (2009). Linking Material and Energy Flow Analysis and Societal Theory. *Ecological Economics*, 68, pp. 1676-1686.
- Schmid Neset, T., Bader, H-P. and Scheidegger, R. (2006). Food Consumption, Nutrient Flows: Nitrogen in Sweden Since 1870's. *Journal of Industrial Ecology*, 10(4), pp. 61-75.
- Schmid Neset, T., Bader, H-P. Scheidegger, R. and Lohm U. (2008). The Flow of Phosphorus in Food Production and Consumption- Linköping, Sweden, 1870-2000,

- Science of the Total Environment*, 396, pp. 111-120.
- Scholz, W. R., Tietje, O. (2002). Embedded Case Study Methods: Integrating Quantitative and Qualitative Knowledge. Sage: London, pp. 271-284.
- Scholz, W. R. (2011). Environmental Literacy in Science and Society- From Knowledge to Decisions. Cambridge Press, pp. 313-314.
- Schwarzenbach, R. C. and Scholz, R. W. (1999). A Regional Perspective on Contaminated Site Remediation-Fate of Materials and Pollutants. *Environmental Science and Technology*, 33 (14), pp. 2305- 2310.
- Sendra, C., Gabarrell, X., and Vicent, T. (2007). Material Flow Analysis Adapted to an Industrial Area. *Journal of Cleaner Production*, 15, pp. 1706-1715.
- Sonesson, U. and J. Berlin. (2002). Environmental Impact of Future Milk Supply Chains in Sweden. A Scenario Study. *Journal of Cleaner Production*, 11, pp. 253-266.
- Streicher-Porte, M., Marthaler, Ch., Böni, H., Schlupe, M., Camacho, A., and Hilty, L. (2009). One Laptop per child, Local Refurbishment or Overseas Donations? Sustainability Assessment of Computer Supply Scenarios for Schools in Colombia. *Journal of Environmental Management*, 90, pp. 3498-3511.
- Subramanian, P.M., (2000). Plastics Recycling and Waste Management in the US. *Resources Conservation and Recycling*, 28, pp. 253-263.
- Tangsubkul, N., Moore, S., and Waite, T. D. (2005). Incorporating Phosphorus Management Considerations into Wastewater Management Practice. *Environmental Science & Policy*, 8, pp. 1-15.
- Tilman, D., Balzer, Ch., Hill, J. and Befort, B. (2011). Global Food Demand and the Sustainable Intensification of Agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96, pp. 5995-6000.
- UN- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2014). World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights (ST/ESA/SER.A/352).
- Van der Voet, E. (1996). Substances from Cradle to Grave-Development of a Methodology for the Substances Flows Through the Economy and the Environment of a Region. Ph.D Thesis. University of Leiden, The Netherlands.
- Van der Voet, E., Egmond, L., Kleijn, R. and Huppés, G. (1994). Cadmium in the European Community: A Policy-Oriented Analysis. *Waste Management Research*, 12, pp. 507-526.
- Van der Voet, E., Kleijn, R., Huele, R., Ishikawa, M. and Verkuijlen, E. (2002). Predicting Future Emissions Based on Characteristics of Stocks. *Ecological Economics*, 41, pp. 223-234.
- Venkatesh, G., Hammervold, J., and Brattebø, H. (2009). Combined MFA-LCA for Analysis of Wastewater PipeLine Networks: Case Study of Oslo, Norway. *Journal of Industrial Ecology*, 13 (4), pp. 532- 550.
- Von Weiszäcker, E., and Ayres, R. U. (2013). Boosting Resource Productivity: Creating Ping-Pong Dynamics Between Resource Productivity and Resource Prices. *Environmental Innovations and Societal Transitions*, 9, pp. 48-55.
- Weisz, H. and Steinberger, J. K. (2010). Reducing Energy and Material Flows in Cities. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2, pp. 185-192.
- Weston, F. R. and Ruth, M. (1997). A Dynamic, Hierarchical Approach to Understanding and Managing Natural Economic Systems. *Ecological Economics*, 21, pp. 1-17.
- WHO. (1989). GEMS: Global Environment Monitoring System, Global Freshwater Quality, Basil Blackwell, Inc. p. 293.
- Wolman, A. (1965). The Metabolism of the City. *Scientific American*, 213, pp. 179-190.
- Yu, J., Williams, E., and Ju, M. (2010). Analysis of Material and Energy Consumption of Mobile Phones in China. *Energy Policy*, 38 (8), pp. 4135-4141.
- Zehnder, A. (1994). Environmental Development: The Way Forward. EAWAG News, October, 36 E, pp. 3-9
- Zhang, K-min., and Wen, Z-guo. (2008). Review and Challenges of Policies of Environmental Protection and Sustainable Development in China. *Journal of Environmental Research*, 88, pp. 1249-1261.
- Zhang, Y. (2013). Urban Metabolism: A Review of Research Methodologies. *Environmental Pollution*, 178, pp. 463-473.

**PARA CITAR ESTE ARTÍCULO /
TO REFERENCE THIS ARTICLE /
PARA CITAR ESTE ARTIGO /**

Díaz-Gómez, J.; Silva-Leal, J.; (2015). Análisis de flujo de materiales en sistemas humanos- una revisión. *Revista EIA*, 12(23) enero- junio, pp. 149-161. [Online]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.14508/reia.2015.12.23.149-161>