



Metabolismo urbano y entropía como catalizadores de la sostenibilidad en sistemas urbanos complejos

Urban metabolism and entropy as catalysts for sustainability in complex urban systems

Metabolismo urbano y entropía como catalizadores de la sostenibilidad en sistemas urbanos complejos

Gustavo Godoy Uribe / Universidad de Concepción, Chile / gustavogodoy@udec.cl

Recibido: 15/2/2023

Aceptado: 16/8/2023

Publicado: 4/10/2023

RESUMEN

La sostenibilidad urbana enfrenta desafíos interconectados que afectan la calidad de vida y el ambiente, requiriendo un enfoque holístico y una metodología adecuada para abordar los sistemas urbanos complejos. El objetivo de este ensayo fue analizar los avances en la teoría del metabolismo y la entropía en conjunto en los sistemas urbanos, identificar concepciones y tendencias y explorar su uso como marco para promover la sostenibilidad urbana. La metodología empleada incluyó una revisión de la literatura en bases de datos relevantes, permitiendo abordar cómo puede el metabolismo urbano y la entropía contribuir al desarrollo de sistemas urbanos sostenibles, al abordar los desafíos interconectados de la sostenibilidad de manera optimista y fundamentada. Se concluyó que el metabolismo urbano es un marco de integración plausible que contribuye a la sostenibilidad urbana al identificar elementos e interacciones de los subsistemas urbanos. La importancia de la entropía como indicador de complejidad y eficiencia del sistema urbano y su relación con el metabolismo se destaca. Para abordar las limitaciones, se propone un marco científico integrado considerando aspectos sociotécnicos, económicos y ecológicos en el análisis de la sostenibilidad urbana que refleje la dualidad simbólico-material coevolutiva.

Palabras clave: ciudad, complejidad urbana, ecosistema urbano, entropía urbana, gestión urbana, planificación urbana, sostenibilidad urbana

ABSTRACT

Urban sustainability faces interconnected challenges that affect the quality of life and the environment, requiring a holistic approach and an adequate methodology to address complex urban systems. The objective of this essay was to analyze advances in the theory of metabolism and entropy as a whole in urban systems, identify conceptions and trends, and explore its use as a framework to promote urban sustainability. The methodology used included a review of the literature in relevant databases, allowing to address how urban metabolism and entropy can contribute to the development of sustainable urban systems, by addressing the interconnected challenges of sustainability in an optimistic and informed manner. It was concluded that the urban metabolism is a plausible integration framework that contributes to urban sustainability by identifying elements and interactions of urban subsystems. The importance of entropy as an indicator of complexity and efficiency of the urban system and its relationship with metabolism is highlighted. To address the limitations, an integrated scientific framework is proposed considering sociotechnical, economic, and ecological aspects in the analysis of urban sustainability that reflects the coevolutionary material-symbolic duality.

Keywords: city, urban complexity, urban ecosystem, urban entropy, urban management, urban planning, urban sustainability

RESUMO

A sustentabilidade urbana enfrenta desafios interligados que afetam a qualidade de vida e o meio ambiente, exigindo uma abordagem holística e uma metodologia adequada para lidar com sistemas urbanos complexos. O objetivo deste ensaio foi analisar os avanços da teoria do metabolismo e da entropia como um todo em sistemas urbanos, identificar concepções e tendências e explorar seu uso como uma estrutura para promover a sustentabilidade urbana. A metodologia utilizada incluiu uma revisão da literatura em bases de dados relevantes, permitindo abordar como o metabolismo urbano e a entropia podem contribuir para o desenvolvimento de sistemas urbanos sustentáveis, abordando os desafios interligados da sustentabilidade de forma otimista e informada. Concluiu-se que o metabolismo urbano é um quadro de integração plausível que contribui para a sustentabilidade urbana ao identificar elementos e interações dos subsistemas urbanos. Destaca-se a importância da entropia como indicador de complexidade e eficiência do sistema urbano e sua relação com o metabolismo. Para enfrentar as limitações, um quadro científico integrado é proposto considerando aspectos sociotécnicos, econômicos e ecológicos na análise da sustentabilidade urbana que reflete a dualidade material-simbólica coevolutiva.

Palavras chave: cidade, complexidade urbana, ecossistema urbano, entropia urbana, gestão urbana, planejamento urbano, sustentabilidade urbana

INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad urbana enfrenta numerosos desafíos interconectados. En el ámbito de contexto, se encuentran problemas como el cambio climático, las pandemias, conflictos bélicos, degradación ecológica, inequidad y crisis socioeconómicas. La capacidad de adaptabilidad al contexto se ve desafiada por problemas como la falta de planificación y gestión urbana efectivas y los resultados nocivos imprevistos, así como la escasa protección y conservación de la biodiversidad. Además, la homeostasis urbana se ve amenazada por problemas como la estratificación social, el consumo y la producción insostenible, la ineficiencia energética, la falta de opciones de transporte sostenible, el desarrollo económico no sostenible y la escasa participación ciudadana. Estos problemas afectan directamente la calidad de vida de las personas y la salud del planeta.

No obstante, estudiar la sostenibilidad urbana en sistemas complejos como las ciudades presenta desafíos como la falta de datos, la complejidad del tema, la necesidad de un enfoque interdisciplinario, la presión por resultados rápidos, la falta de financiamiento, la dificultad para medir la sostenibilidad, las dificultades en la implementación de soluciones, la falta de compromiso político, la resistencia a cambios en el comportamiento humano y las desigualdades en la distribución de beneficios. Por lo tanto, para abordar la sostenibilidad urbana se requiere una visión holística e integrada que contemple las diferentes dimensiones de la sostenibilidad y una metodología adecuada para el estudio de sistemas urbanos complejos.

El metabolismo urbano y la entropía son conceptos complementarios que contribuyen al estudio integral de sistemas urbanos sostenibles. El metabolismo urbano, una metodología sistemática, analiza y optimiza los flujos de materiales y energía en las ciudades, lo que permite identificar oportunidades de mejora en el uso de recursos y en la gestión de residuos. Por otro lado, la entropía urbana ayuda a comprender los procesos de crecimiento y evolución de sistemas urbanos complejos, revelando patrones y tendencias en el consumo de recursos y la generación de residuos.

Los estudios en metabolismo urbano abordan temas cruciales como sostenibilidad, planificación urbana y bienestar; proporcionando una comprensión integral de las interacciones entre estos elementos. Estas investigaciones, a través de enfoques multidisciplinarios e innovadores, ofrecen bases sólidas para el desarrollo de estrategias y soluciones en la gestión de ciudades, facilitando la transición hacia modelos de desarrollo urbano más sostenibles y resilientes. Los avances en el campo del metabolismo urbano son fundamentales para la formulación de políticas y prácticas urbanas informadas, mejorando la calidad de vida y el bienestar de los habitantes de las ciudades.

El objetivo de este ensayo ha sido examinar los avances en la teoría del metabolismo y la entropía de los sistemas urbanos en conjunto, con el propósito de identificar las concepciones y tendencias recientes en la literatura científica entre 2019 y 2023. Se buscó explorar las posibilidades y limitaciones del uso del metabolismo y la entropía como marco para promover la sostenibilidad urbana. El ensayo no pretendió concluir la discusión sobre las concepciones mencionadas, sino recorrer las últimas tendencias del escenario fenomenológico urbano en torno al metabolismo y la entropía, orientando futuras investigaciones en el campo, cuyo impacto social puede derivarse de la aplicación de nuevas investigaciones y la refinación de la teoría y el método.

La metodología adoptada para abordar la relación entre el metabolismo urbano, la entropía y la sostenibilidad en sistemas urbanos complejos implica una revisión de la literatura en las bases de datos *Web of Science* y *Scopus*. Se emplearon palabras clave como *metabolism*, *entropy*, *sustainability* y *urban* para identificar estudios relevantes. Los resultados en las revistas en su conjunto dieron como resultado tres publicaciones. La estructura del ensayo se basa en evaluar los antecedentes fundamentales encontrados relacionados con los asentamientos urbanos (origen, atractivo y desarrollo), metabolismo y entropía (concepción, caracterización, relación y uso) y sostenibilidad que complementan los hallazgos. La información recolectada de *Web of Science* y *Scopus* permitió abordar la pregunta de investigación ¿Cómo puede el metabolismo urbano y la entropía en conjunto contribuir al desarrollo de sistemas urbanos sostenibles al abordar los desafíos interconectados?, desde una perspectiva optimista respecto al método.

La estrategia metodológica y la estructura del ensayo se centraron en analizar críticamente los estudios seleccionados, identificando patrones, tendencias y enfoques metodológicos en el ámbito del metabolismo urbano, la entropía y la sostenibilidad. Posteriormente, se integraron los resultados para proponer un enfoque holístico que permita abordar la sostenibilidad en sistemas urbanos complejos mediante el estudio del metabolismo urbano y entropía. Este enfoque considera múltiples dimensiones, actores y escalas para el avance hacia la sostenibilidad urbana.

El ensayo científico presentó importantes implicaciones tanto científicas como sociales. Desde el punto de vista científico, el estudio proporciona una reflexión sobre las últimas tendencias y evidencias sobre el tema particular, lo que puede ayudar a avanzar en la comprensión y resolución de problemas en diferentes áreas de investigación relacionadas a la sostenibilidad urbana. Además, este ensayo puede contribuir al desarrollo de nuevas teorías o enfoques metodológicos, incidiendo de forma significativa en el campo de estudio. Desde el punto de vista social, el ensayo científico puede tener implicaciones importantes en la toma de decisiones, ya que proporciona información relevante y fundamentada para la sociedad

en general. Además, el ensayo científico puede tener un impacto en la forma en que la gente piensa y actúa en relación con el tema de estudio, lo que puede tener consecuencias a largo plazo en diferentes ámbitos de la vida humana.

DESARROLLO

Los sistemas urbanos complejos y su contexto han sido objeto de estudio, se han abordado aspectos como su origen, estructura, dinámica, presiones, amenazas, evolución, desequilibrio y sostenibilidad (Delivandani *et al.*, 2021; Evans *et al.*, 2021; Jayme, 2022), formando verdaderos archipiélagos disciplinares del sistema urbano. Estos sistemas complejos presentan características homeostasis y adaptabilidad ante cambios endógenos y exógenos que desafían los enfoques de planificación, gestión y evaluación, lo que da preponderancia a los enfoques holísticos y a los aspectos no abordados como la resiliencia (Delivandani *et al.*, 2021; Tolstykh *et al.*, 2020; Arosio *et al.*, 2020; Díaz, 2014). Por esta razón, se han estudiado los desafíos y oportunidades en la planificación, la gestión y evaluación, destacando la necesidad de enfoques metodológicos innovadores y holísticos para abordar el desarrollo de políticas que hagan frente a las amenazas que estos enfrentan para mantener su sostenibilidad y mejorar o al menos mantener, la calidad de vida (Tolstykh *et al.*, 2020).

El desafío de crear un marco para la sostenibilidad en los asentamientos humanos radica en su dualidad simbólico-material coevolutiva (psicosfera y tecnosfera), que se complejiza desde su origen de naturaleza multidimensional (Delivandani *et al.*, 2021; Jayme, 2022; Fróes y Køster, 2020). Estos sistemas urbanos, caracterizados por su crecimiento rápido, competitivo e imprevisto, presentan desafíos en la satisfacción de sus necesidades y la minimización de las emisiones y desechos generados (Tolstykh *et al.*, 2020; Evans *et al.*, 2021). La complejidad urbana está asociada a altos niveles de entropía (Tolstykh *et al.*, 2020; Díaz, 2014), lo que se refleja en externalidades negativas, como desigualdad, problemas de salud, mortalidad, y cambio climático (Yang *et al.*, 2020; Danish *et al.*, 2020). La tendencia de la migración hacia las ciudades perpetúa sistemas urbanos convencionales y acelera la entropía del sistema (Cheng *et al.*, 2020; Oliinyk *et al.*, 2021; Shekhar *et al.*, 2019). La entropía urbana es impulsada por factores económicos, sociales, de transporte y políticos; y su manejo adecuado puede generar desarrollo sostenible (Tolstykh *et al.*, 2020; Cabral *et al.*, 2013).

El metabolismo urbano, originado como teoría político-económica de Karl Marx, evolucionó hacia un enfoque holístico para evaluar ecosistemas sociales complejos y su impacto en la naturaleza (Arosio *et al.*, 2020; Díaz, 2014; Bahers *et al.*, 2022). Desde la propuesta de Wolfman en 1965, los métodos en el estudio del metabolismo urbano han aumentado y diversificado en términos de enfoque y aplicación (Tang *et al.*, 2021; Elliot *et al.*, 2019). Sin embargo, este enfoque se ha desarrollado en corrientes teóricas aisladas, lo que limita su potencial para abordar la sostenibilidad urbana de manera integral (Bahers *et al.*, 2022). Las limitaciones del metabolismo urbano se deben a su enfoque en la materialidad del sistema urbano

y la falta de un marco de indicadores sistematizados para la integración multidimensional y socialmente extendida (Bahers *et al.*, 2022; Song *et al.*, 2019; Céspedes y Morales-Pinzón, 2018).

El metabolismo urbano proporciona un marco para comprender y recomendar qué, cuánto y cómo se puede adquirir, distribuir, utilizar y reutilizar recursos como el suelo, energía, agua, alimentos y materiales para satisfacer los requerimientos urbanos y mejorar su sostenibilidad; a la vez que revela la procedencia de residuos y emisiones; es decir, manifiesta estados, flujos, procesos e infraestructura y su distribución en los sistemas urbanos complejos, lo que permiten observar si existe un equilibrio en el sistema urbano y la interacción de este con el sistema natural o antropogenizado. Desde su concepción y evolución teórica (Díaz, 2014; Toledo, 2013), el metabolismo urbano ha sido caracterizado y medido a través de diversas metodologías y enfoques, para evaluar sistemas humanos globales hasta domésticos (Delivandani *et al.*, 2021; Céspedes y Morales-Pinzón, 2018; Tang *et al.*, 2021).

La entropía se refiere a la medida de desorden o desorganización de un sistema, lo que permite en el caso urbano evaluar la complejidad y resiliencia del sistema frente a perturbaciones. De ahí que la entropía indica que existe una constante transformación de recursos interconectados e interdependientes que circulan constantemente. Por lo que la entropía cubre la desorganización compleja ante fluctuaciones de contexto y homeostasis (Tolstykh *et al.*, 2020). Las aplicaciones prácticas y enfoques metodológicos en los últimos estudios han evolucionado a lo largo del tiempo con base en contextos cambiantes, considerando modelos ecosistémicos para el logro de la sostenibilidad a través del mecanismo de evaluación de la entropía de subsistemas (Tolstykh *et al.*, 2020; Delivandani *et al.*, 2021; Song *et al.*, 2019), destacando su importancia y aplicabilidad en la gestión sostenible de las ciudades.

El metabolismo urbano y la entropía son metodologías que permiten analizar y comprender la complejidad de los sistemas urbanos desde múltiples perspectivas, incluyendo aspectos sociotécnicos, económicos y ecológicos. En el caso del metabolismo urbano, se analizan los flujos de materiales y energía en las ciudades, lo que permite identificar patrones de consumo y generación de residuos y, por lo tanto, oportunidades de mejora en la gestión de recursos. Esto implica considerar tanto los aspectos técnicos de los sistemas urbanos (infraestructuras, tecnologías, etc.) como los aspectos sociales y económicos (patrones de consumo, producción y distribución, etc.) que influyen en los flujos de materiales y energía.

Por su parte, la entropía se emplea para comprender la evolución y crecimiento de los sistemas urbanos, y cómo estos procesos afectan el consumo de recursos y la generación de residuos. La entropía permite analizar el grado de orden y desorden en los sistemas urbanos y la energía requerida para mantener su organización y funciones, lo que permitiría tener una relación de resiliencia urbana. Para considerar el contexto y las especificidades de cada ciudad o región en el análisis de la sostenibilidad urbana, es necesario realizar un diagnóstico previo de la situación actual y las problemáticas específicas de cada lugar. Esto implica la

recopilación de información y datos relevantes para el análisis, así como la participación de diferentes actores sociales, políticos y económicos en el proceso de diagnóstico y formulación de soluciones.

La sostenibilidad en sistemas urbanos complejos es un tema de creciente interés en la literatura científica. Los principios y objetivos de la sostenibilidad urbana han sido estudiados por diversos autores, los cuales buscan formas de identificar el perfil urbano de modo de proponer formas de regular el metabolismo y reducir la entropía de sistemas urbanos. Delivandani *et al.* (2021); Tolstykh *et al.* (2020) y Bahers *et al.* (2022) proponen indicadores y herramientas de evaluación para medir y monitorear el progreso hacia la sostenibilidad, aunque estos también presentan problemas de interpretabilidad y presentan dificultades de integración (Tolstykh *et al.*, 2020; Elliot *et al.*, 2019; Danish *et al.*, 2020). La integración conceptual y metodológica de ambos enfoques ha sido explorada por algunos autores (Fróes y Køster, 2020; Cabral *et al.*, 2013), quienes destacan ejemplos de sinergias y *trade-offs* en la práctica (Cheng *et al.*, 2020). Además, el papel de la entropía en la planificación urbana sostenible ha sido estudiado en trabajos recientes (Tolstykh *et al.*, 2020; Arosio *et al.*, 2020), resaltando su importancia en el análisis y diseño de políticas urbanas. Algunos casos de estudio y lecciones aprendidas en la aplicación de estos enfoques han sido presentados en la literatura, como que la sostenibilidad depende del equilibrio de los elementos que componen la capacidad del sistema de manera que este mantenga su desarrollo, lo que en conjunto significaría un equilibrio dinámico ante presiones endógenas o exógenas (Morel *et al.*, 2019; Tolstykh *et al.*, 2020; Delivandani *et al.*, 2021; Oliinyk *et al.*, 2021), lo que muestra la utilidad del metabolismo y entropía en la planificación y gestión del desarrollo de sistemas urbanos complejos (Tolstykh *et al.*, 2020).

Para abordar los desafíos y las limitaciones, es necesario desarrollar un marco científico integrado que incorpore tanto el metabolismo como la entropía en el análisis sistémico de la sostenibilidad en sistemas urbanos complejos. Este marco integrado debería considerar los aspectos sociotécnicos, económicos y ecológicos del metabolismo urbano, así como la entropía como una medida del desorden y la energía requerida para mejorar la organización y mantener las funciones políticas, sociales, económicas y ecológicas de los sistemas urbanos. Al combinar estos enfoques, sería posible abordar las dimensiones no exploradas en la literatura y proporcionar una base sólida para el análisis crítico sistémico de la sostenibilidad urbana.

Uno de los primeros pasos para desarrollar este marco integrado con enfoque sistémico es establecer un conjunto de elementos claves del sistema urbano, sus interconexiones e indicadores claves que aborden las múltiples dimensiones de la sostenibilidad urbana. Estos indicadores podrían incluir medidas de eficiencia energética, emisiones de gases de efecto invernadero, acceso a servicios básicos, equidad social y calidad de vida. Además, se debe-

rían incorporar indicadores específicos para medir la entropía urbana y su relación con el metabolismo urbano. Para garantizar la efectividad de este marco, es crucial promover la colaboración interdisciplinaria y transdisciplinaria, fomentando la participación de expertos en campos como la ecología urbana, la planificación urbana, la economía y la sociología. La colaboración entre estos campos permitirá abordar de manera más completa y holística los desafíos y oportunidades en la planificación y gestión de la sostenibilidad urbana. Además, el marco integrado debe considerar el contexto y las especificidades de cada ciudad o región, ya que las soluciones para la sostenibilidad urbana deben adaptarse a las condiciones locales y culturales. Esto implica un enfoque flexible y adaptable, capaz de incorporar nuevas perspectivas y conocimientos a medida que surjan.

Finalmente, este marco integrado debe ser probado y validado a través de casos de estudio y análisis empíricos. Al estudiar y aprender de las experiencias de diversas ciudades y regiones, se podrán identificar las mejores prácticas y lecciones aprendidas en la promoción de la sostenibilidad urbana mediante el enfoque combinado del metabolismo y la entropía.

Como resultado de este estudio se desprende que la sostenibilidad urbana compleja está compuesta de varios componentes, entre ellos el componente de contexto que presenta condiciones de dependencia de los sistemas urbanos, el componente sistémico como el conjunto de elementos y relaciones funcionales, el componente de adaptabilidad que corresponde a la capacidad instalada del sistema frente a los desafíos del contexto o las presiones internas, y el componente de homeostasis como equilibrio dinámico entre componentes y procesos como la flexibilidad de autorregulación para un funcionamiento óptimo.

El enfoque holístico del metabolismo y la entropía urbana proporcionan herramientas para cada uno de los componentes complejos de la sostenibilidad urbana. En el contexto permiten identificar dependencias, origen-destino, flujos, procesos de crecimiento y evolución del sistema urbano, revelando información sobre los patrones y tendencias en la interacción de la ciudad con su entorno. En el sistema mismo se pueden estudiar los intercambios sistémicos, la interdependencia, modularidad, entre otros indicadores propios de la robustez del sistema. En el componente de adaptabilidad el metabolismo permite observar la capacidad instalada y las oportunidades de mejora, la entropía, por su parte, permite caracterizar la resiliencia y capacidad de respuesta ante perturbaciones. En la homeostasis del sistema urbano permite evaluar la distribución de recursos, permitiendo identificar desequilibrios, y también el grado de orden dentro del proceso de equilibrio dinámico.

Con referencia a los estudios encontrados en las bases de datos no contienen un análisis de interconexión interna, sino más bien enfoques específicos de equilibrio de entrada-salida, de circularidad de ciertos elementos del sistema, ineficiencia del uso de capital, dependencia de la sostenibilidad del sistema al capital natural. Consideran factores físicos e indicadores integrales, socioeconómicos y naturales disponibles, lo que dirige las sugerencias

propuestas de intervención de sostenibilidad de los sistemas urbanos en mencionados estudios. Solo un artículo reorienta la necesidad prioritaria sobre el desarrollo de directrices para el desarrollo sostenible. Lo que reafirma la idea de archipiélago disciplinar persistente. Lo que responde al objeto planteado que revela la falta de desarrollo y propuestas en torno a los componentes de la sostenibilidad urbana compleja como dualidad simbólica, material coevolutiva en cuanto a origen, atractivo y desarrollo de los asentamientos urbanos.

Lo anterior indica y refuerza la necesidad de elaborar marcos sistémicos como el propuesto que permitan enriquecer los análisis, por ejemplo, a través de la teoría de grafos, dinámica de sistemas o redes neuronales. También se requiere integrar metodológicamente el metabolismo y entropía urbana para hacer frente a las componentes de la sostenibilidad urbana compleja que no pueden ser dilucidadas con estudios de indicadores o métodos tradicionales.

CONCLUSIONES

La sostenibilidad urbana es un desafío complejo, que enfrenta numerosos problemas interconectados en áreas como el cambio climático, las pandemias, la degradación ambiental y la inequidad socioeconómica. El estudio de la sostenibilidad urbana requiere un enfoque holístico, sistémico e integrado que contemple las diferentes dimensiones del problema y una metodología adecuada para abordar los sistemas urbanos complejos.

El metabolismo urbano y la entropía son conceptos complementarios que contribuyen al estudio integral de sistemas urbanos sostenibles. El metabolismo urbano analiza y optimiza los flujos de materiales y energía en las ciudades, permitiendo identificar oportunidades de mejora en el uso de recursos y en la gestión de residuos. Por otro lado, la entropía urbana ayuda a comprender los procesos de crecimiento y evolución de los sistemas urbanos, revelando patrones y tendencias en el consumo de recursos y la generación de residuos. Los avances en el campo del metabolismo urbano y la entropía son fundamentales para la formulación de políticas y prácticas urbanas informadas, mejorando la calidad de vida y el bienestar de los habitantes de las ciudades. Estos enfoques permiten analizar la complejidad de los sistemas urbanos desde múltiples perspectivas y considerar tanto los aspectos técnicos como los aspectos sociales y económicos que influyen en los flujos de materiales y energía. Sin embargo, existen desafíos y limitaciones en el estudio de la sostenibilidad urbana, como la falta de datos, la complejidad del tema, la necesidad de un enfoque interdisciplinario y la dificultad para medir la sostenibilidad. Para abordar estos desafíos, es necesario desarrollar un marco científico integrado que combine el metabolismo urbano y la entropía en un enfoque sistémico de la sostenibilidad urbana.

Este marco integrado debe considerar los aspectos sociotécnicos, económicos y ecológicos del metabolismo urbano, así como la entropía como medida del desorden y la energía requerida para mantener la organización de los sistemas urbanos. Además, se deben estable-

cer indicadores claves y promover la colaboración interdisciplinaria y transdisciplinaria. Para garantizar la efectividad de este marco, es importante adaptarlo al contexto y las especificidades de cada ciudad o región, y validar su aplicabilidad a través de casos de estudio y análisis empíricos. A través del estudio y aprendizaje de diversas experiencias se podrán identificar las mejores prácticas en la promoción de la sostenibilidad urbana. En última instancia, el desarrollo de un marco integrado que combine el metabolismo urbano y la entropía como enfoques complementarios permitirá abordar de manera más completa y holística los desafíos y oportunidades en la planificación y gestión de la sostenibilidad urbana, contribuyendo así a la creación de ciudades más sostenibles y resilientes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arosio, M., Martina, M. L. V. y Figueiredo, R. (2020). The whole is greater than the sum of its parts: A holistic graph-based assessment approach for natural hazard risk of complex systems. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(2), 521-547. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-521-2020>
- Bahers, J-B., Athanassiadis, A., Perrotti, D. y Kampelmann, S. (2022). The place of space in urban metabolism research: Towards a spatial turn? A review and future agenda. *Landscape and Urban Planning*, 221, e104376. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104376>
- Cabral, P., Augusto, G., Tewolde, M. y Araya, Y. (2013). Entropy in Urban Systems. *Entropy*, 15(12), 5223-5236. <https://doi.org/10.3390/e15125223>
- Céspedes, J. D. y Morales-Pinzón, T. (2018). Urban metabolism and sustainability: Precedents, genesis and research perspectives. *Resources Conservation and Recycling*, 131, 216-224. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.023>
- Cheng, Z., Prakash, K., Smyth, R. y Wang, H. (2020). Housing wealth and happiness in Urban China. *Cities*, 96, e102470. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.102470>
- Danish, Ulucak, R. y Khan, S. U-D. (2020). Determinants of the ecological footprint: Role of renewable energy, natural resources, and urbanization. *Sustainable Cities and Society*, 54, e101996. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101996>
- Delivandani, F., Rajabi, A. y Kermani, A. N. (2021). Process-Based Improvement of Urban Metabolism in Optimizing the Development Cycle of the Small City Using MIA Method. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, e5545307. <https://doi.org/10.1155/2021/5545307>

- Díaz, A. (2014). Metabolismo urbano: Herramienta para la sustentabilidad de las ciudades. *Interdisciplina*, 2(2). <http://dx.doi.org/10.22201/ceiich.24485705e.2014.2.46524>
- Elliot, T., Almenar, J. B., Niza, S., Proença, V. y Rugani, B. (2019). Pathways to Modelling Ecosystem Services within an Urban Metabolism Framework. *Sustainability*, 11(10), 2766. <https://doi.org/10.3390/su11102766>
- Evans, D. L., Vis, B. N., Dunning, N. P., Graham, E. y Isendahl, Ch. (2021). Buried solutions: How Maya urban life substantiates soil connectivity. *Geoderma*, 387, 114925. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114925>
- Fróes, I. y Køster, M. (2020). Co-creating sustainable urban metabolism towards healthier cities. *Urban Transformations*, 2, 5. <https://doi.org/10.1186/s42854-020-00009-7>
- Jayme, O. (2022). A magnitude da tecnosfera: Uma importante reflexão para a arqueologia. *Revista Arqueologia Pública*, 17, e022010. <https://doi.org/10.20396/rap.v17i00.8668743>
- Morel, R., Bazzo, E. y Garcia, L. E. (23-28 de junio de 2019). *Assessment of municipal solid waste management system using a mixing index as indicative for urban sustainability analysis*. [Conferencia]. 32nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Wroclaw, Poland. <https://acortar.link/GO5zk9>
- Oliinyk, O., Bilan, Y., Mishchuk, H., Akimov, O. y Vasa, L. (2021). *The impact of migration of highly skilled workers on the country's competitiveness and economic growth*. *Montenegrin Journal of Economics*, 17(3), 7-19. <https://doi.org/10.14254/1800-5845/2021.17-3.1>
- Shekhar, H., Schmidt, A. J. y Wehling, H-W. (2019). Exploring wellbeing in human settlements—A spatial planning perspective. *Habitat International*, 87, 66-74. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2019.04.007>
- Song, Y., van Timmeren, A. y Wandl, A. (2019). A literature review and categorisation of sustainability-aimed urban metabolism indicators: A context, indicator, mechanism, outcome analysis. *Regional Statistics*, 9(1), 54-71. <https://acortar.link/S5mBO8>
- Tang, M., Hong, J., Guo, S., Liu, G. y Shen, G. Q. (2021). A bibliometric review of urban energy metabolism: Evolutionary trends and the application of network analytical methods. *Journal of Cleaner Production*, 279, e123403. <https://doi.org/gmg8vt>
- Toledo, V. M. (2013). El metabolismo social: Una nueva teoría socioecológica. *Relaciones. Estudios de Historia y Sociedad*, 34(136), 41-71. <https://acortar.link/xrSm8j>

Tolstykh, T., Gamidullaeva, L., Shmeleva, N. y Lapygin, Y. (2020). Regional Development in Russia: An Ecosystem Approach to Territorial Sustainability Assessment. *Sustainability*, 12(16), 6424. <https://doi.org/10.3390/su12166424>

Yang, J., Wang, Y., Xiu, C., Xiao, X., Xia, J. y Jin, C. (2020). Optimizing local climate zones to mitigate urban heat island effect in human settlements. *Journal of Cleaner Production*, 275, e123767. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123767>