



POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

Sostenibilidad urbana: De la revisión sistemática global a la integración de herramientas espaciales para evaluar la sostenibilidad urbana en la ciudad semiárida de San Luis Potosí

Tesis que presenta

Lic. Saliha del Carmen Barbosa Martínez

Para obtener el grado de

Maestra en Ciencias Ambientales

Director de tesis

Dr. Fredy Alexander Alvarado Roberto

Investigador Titular A

División de Ciencias Ambientales

San Luis Potosí, San Luis Potosí, 23 de septiembre de 2024



Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en la División de Ciencias Ambientales del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección del Dr. Fredy Alexander Alvarado Roberto

Durante la realización del trabajo, el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Número de Registro 1242565) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a mis padres, por su constante apoyo y sacrificio para brindarme la oportunidad de seguir mis estudios, por su paciencia durante todo el proceso de investigación. A mis amigos y seres queridos, por su comprensión y ánimo en los momentos difíciles. Su apoyo ha sido fundamental en la culminación de este proyecto

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca otorgada para llevar a cabo mis estudios de posgrado.

A la División de Ciencias Ambientales del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, gracias por aceptarme y permitirme realizar mi proyecto de maestría en sus instalaciones, y por el apoyo brindado durante su desarrollo.

Agradezco a mi director de tesis, el Dr. Fredy Alexander Alvarado Roberto, por su guía y apoyo invaluable durante el proceso académico. Sus conocimientos expertos y orientación han sido fundamentales para la culminación de este importante logro académico. De igual manera, agradezco el apoyo, enseñanzas y acompañamiento de mi comité tutorial conformado por la Dra. Aura Ontiveros y los doctores Juan Jose Von Thaden y Renato Ramos.

Quiero expresar mi gratitud a mis compañeros de clase por sus valiosas contribuciones y discusiones que enriquecieron este trabajo. Agradezco al grupo de trabajo laboratorio de paisajes antrópicos sostenibles, sus comentarios fueron valiosos.

También agradezco a mi familia por su constante apoyo y comprensión durante este desafiante proceso de investigación

Índice

Créditos Institucionales.....	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Abstract	ix
Resumen	x
Introducción general	1
Objetivos.....	4
Hipótesis	5
Referencias	6
Capítulo 1	19
Resumen	20
1. Introducción	21
2. Materiales y métodos.....	26
2.1. Método PRISMA 2020	26
2.2. Estrategia de búsqueda	26
2.3. Criterios de inclusión.....	27
2.4. Criterios de exclusión	27
2.5. Flujo de búsqueda.....	27
2.6. Análisis bibliométrico usando Vosviewer	29

3. Resultados	30
3.1. Enfoque geográfico.....	30
3.2. Artículos por año de publicación.....	32
3.3. Metodologías de Evaluación de la Sostenibilidad Urbana	32
3.4. Dimensiones de sostenibilidad urbana	33
3.5. Número de indicadores por dimensiones.....	35
3.6. Análisis de palabras claves	36
4. Discusión.....	39
4.1. Enfoque geográfico.....	40
4.2. Artículos por año de publicación.....	43
4.3. Metodologías utilizadas	44
4.4. Dimensiones de la sostenibilidad	45
4.5. Numero de indicadores por dimensiones.....	47
4.6. Palabras claves.....	48
5. Conclusión	50
6. Referencias	51
Capítulo 2	63
Sostenibilidad urbana en San Luis Potosí: Integración de herramientas espaciales en el análisis de una ciudad árida.	63
Resumen	64

1. Introducción	66
2. Metodología y datos.....	70
2.1. Área de estudio	70
2.2. Datos geoespaciales empleados en el Índice de Sostenibilidad Urbana (ISU): ...	72
Capa 1. Análisis de la temperatura superficial (LST).....	74
Capa 2. Infraestructura verde urbana publica.....	75
Capa 3. Calidad del aire.....	76
Capa 4. Densidad poblacional	76
Capa 5. Viviendas que disponen de agua entubada y se abastecen del servicio público de agua.....	77
Capa 6. Grado promedio escolar	78
Capa 7. Infraestructura Urbana.....	78
2.3. Construcción del Índice de Sostenibilidad Urbana (ISU)	81
3. Resultados	83
4. Discusión.....	84
5. Conclusión	88
6. Referencias	90
Conclusiones Generales.....	104
Material suplementario	106

Índice de Tablas

Tabla 1. Metodologías de evaluación de la sostenibilidad urbana de la literatura.	33
Tabla 2. Indicadores para la evaluación de la sostenibilidad urbana.....	73

Índice de Figuras

Figura 1. Selección de documentos guiada por el enfoque PRISMA.	28
Figura 2. Artículos publicados sobre Evaluación Sostenibilidad Urbana por país. Los círculos rosas indican la ubicación geográfica de los trabajos y el tamaño del círculo es proporcional al número de artículos publicados.	31
Figura 3. Artículos por año de publicación.	32
Figura 4. Organización de las dimensiones de sostenibilidad urbana.	34
Figura 5. Número de indicadores por dimensiones	36
Figura 6. Análisis de palabras claves.....	38
Figura 7. Mapa de ubicación de la ciudad de SLP	71
Figura 8. Esquema de la metodología utilizada en el presente capítulo.....	73
Figura 9. LST-a, Infraestructura verde publica-b, calidad del aire-c, densidad poblacional-d	79
Figura 10. Viviendas que cuentan con agua potable-e, Grado promedio escolar-f e infraestructura urbana-g.....	80
Figura 11. Modelación espacial de la sostenibilidad urbana	82
Figura 12. Mapa del grado de marginación en la ciudad de SLP	106

Abstract

The accelerated growth of urban areas, coupled with the lack of planning, has highlighted the urgent need to implement multidisciplinary strategies that mitigate the negative impacts of urbanization. In this context, it is important to understand and quantify how we can generate sustainable cities. However, there are divergences in the evaluation methods and even in the theoretical definitions of urban sustainability. Therefore, this master's dissertation is composed of two chapters that seek to contribute to the discussion on urban sustainability. The objective of the first chapter was to systematically review, using a bibliometric approach, the most common methods, as well as to identify the categories, dimensions and indicators used to evaluate urban sustainability. We found a wide variety in urban sustainability indicators and a marked geographic bias in their evaluation. Despite their importance, there is no consensus on which indicators to use and which methodologies are applied to a particular scenario. The second chapter focused on a case study to evaluate urban sustainability in the city of San Luis Potosí. In this chapter we employ a multidisciplinary approach to generate an Urban Sustainability Index (USI), as a spatially explicit tool that allows describing urban sustainability levels by integrating socioeconomic and environmental indicators. Our results reveal that the city of SLP, in addition to being below the average in urban sustainability, also presents a marked luxury effect, that is, greater availability of urban infrastructure and greater concentration of vegetation cover in areas with the lowest degree of socioeconomic marginalization. The USI calculated in this research can be applied in arid city scenarios as an urban design and planning strategy based on spatial characteristics and open access metadata. The USI is proposed as a key tool for the search for urban sustainability in San Luis Potosí.

Resumen

El crecimiento acelerado de las áreas urbanas, sumado a la falta de planificación, ha evidenciado la necesidad urgente de implementar estrategias multidisciplinarias que mitiguen los impactos negativos de la urbanización. En este contexto, es importante comprender y cuantificar como podemos generar ciudades sostenibles. No obstante, existen divergencias en los métodos de evaluación e incluso en las definiciones teóricas de sostenibilidad urbana. Por lo anterior la presente disertación de maestría está compuesta por dos capítulos que buscan aportar a la discusión sobre la sostenibilidad urbana.

El objetivo del primer capítulo fue revisar de manera sistemática empleando un enfoque bibliométrico los métodos más comunes, así como identificar las categorías, dimensiones e indicadores empleados para evaluar la sostenibilidad urbana. Encontramos una amplia variedad en los indicadores de sostenibilidad urbana y un marcado sesgo geográfico en su evaluación. A pesar de su importancia no existe un consenso sobre cuales indicadores utilizar y que metodologías son aplicadas a un escenario en particular.

El segundo capítulo se centró en un caso de estudio para evaluar la sostenibilidad urbana en la ciudad de San Luis Potosí. En este capítulo empleamos un enfoque multidisciplinario para generar un Índice de Sostenibilidad Urbana (ISU), como una herramienta espacialmente explícita que permite describir los niveles de sostenibilidad urbana integrando indicadores socioeconómicos y ambientales. Nuestros resultados revelaron que la ciudad de SLP además de estar por debajo de la media de sostenibilidad urbana, también presenta un marcado efecto de lujo, es decir mayor disponibilidad de infraestructura urbana y mayor concentración de cobertura vegetal en áreas con el menor grado de marginación socioeconómica. El ISU calculado en esta investigación puede ser aplicado en escenarios de ciudades áridas como

una estrategia de diseño y planeamiento urbano basado en características espaciales y metadatos de acceso abierto. El ISU se propone como una herramienta clave para la búsqueda de la sostenibilidad urbana de San Luis Potosí.

Introducción general

La sostenibilidad es una definición que abarca múltiples dimensiones y es uno de los temas más recurrentes del siglo XXI. Como concepto, aparece en 1987 en el informe Brundtland “Our Common Future”, y se definió como “El desarrollo sostenible necesario para satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades” (Brundtland, 1987).

Sin embargo, el paradigma de la sostenibilidad surge como una respuesta contemporánea a los desafíos ambientales, sociales y económicos que enfrenta nuestra sociedad a nivel global (Jordan, 2013). La sostenibilidad busca encontrar un equilibrio entre el desarrollo humano y los sistemas ambientales (Tanguay et al., 2010). En consecuencia, se han propuesto tres dimensiones clásicas de la sostenibilidad (el económico, el social y el ambiental). Sin embargo, su aplicación, conlleva la integración de diversos factores, por lo que se han desarrollado múltiples marcos metodológicos y herramientas para su medición, lo que muchas veces conlleva en dificultades para medirla y compararla.

En el año 2012 la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Desarrollo Sostenible Río+20 enfatizó que las ciudades deberían considerarse como uno de los principales ejes de acciones a priorizarse para la transición hacia el anhelado desarrollo sostenible. Por esta razón, en el año 2015 surgieron los Objetivos de desarrollo sostenible (ODS), en donde se buscó la integración de la sostenibilidad urbana en los marcos políticos, tomando relevancia específicamente en el Objetivo 11: “Hacer que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles”(Michalina et al., 2021).

Por esta razón, no es sorprendente que se preste cada vez más atención a las ciudades y su papel en el logro de la sostenibilidad (Sharifi, 2021). Las ciudades representan apenas el 3% de la superficie terrestre, sin embargo, consumen aproximadamente el 80% de la energía mundial, y produce cerca del 75% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (Naciones Unidas, 2024).

La sostenibilidad urbana ha tomado relevancia en las últimas décadas tanto en la agenda política de los países, como en el área científica, sin embargo, no hay un consenso general y existe ambigüedad sobre la definición de sostenibilidad urbana (Huang et al., 2015; Michalina et al., 2021; Tanguay et al., 2010). De acuerdo con Corredor-Ochoa y colaboradores (2020), la sostenibilidad urbana es la capacidad de una ciudad para mantener y fortalecer la sostenibilidad en entornos urbanos, esta capacidad abarca una gama de características cuantificables que se manifiestan desde el nivel local hasta el regional y nacional.

Por consiguiente, la importancia de evaluar la sostenibilidad urbana radica en el desarrollo de herramientas de planeación y gestión urbana, facilitando a los planificadores y formuladores de políticas monitorear el progreso hacia las metas y simplificar los procesos de propuestas de desarrollo aprobadas (Foroozesh et al., 2022). En otras palabras, es crucial para comprender y abordar los impactos ambientales, sociales y económicos de la urbanización (Corredor-Ochoa et al., 2020). Sin embargo, la evaluación de la sostenibilidad urbana presenta múltiples desafíos, porque las ciudades comprenden ecosistemas dinámicos y heterogéneos, moldeados por influencias ambientales, sociopolíticas y económicas particulares (Sharifi, 2021).

Por esta razón, el consenso sobre el uso de indicadores de sostenibilidad urbana sigue siendo un desafío actual, debido a la complejidad y diversidad de los contextos urbanos (Corredor-Ochoa et al, 2020; Mori y Christodoulou, 2012). Diversos autores, han señalado la importancia de desarrollar y seleccionar indicadores de sostenibilidad razonados teóricamente para garantizar alineación con los principios de sostenibilidad y aplicabilidad en todas las escalas urbanas (Cohen, 2017), resaltando que el uso de indicadores es la manera más efectiva y apropiada para la evaluación urbana de la sostenibilidad (Michalina et al., 2021; Rebolledo-Leiva et al., 2023).

Existen diferentes herramientas y metodología propuestos para evaluar la sostenibilidad en entornos urbanos, entre los que destacan BREEAM Community, LEED-ND, CASBEE-UD, que usan indicadores urbanos específicos y sistemas de ponderación, aplicado a barrios y vecindarios (de Siqueira et al., 2020; Zarekar et al., 2023). También destacan los análisis multicriterio, como el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y Toma de Decisiones Multicriterio (MCD) (Amoushahi et al., 2021; Khodakarami et al., 2023). Por otro lado, los análisis de que utilizan los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y percepción remota para evaluar la sostenibilidad urbana (Bhakti et al., 2024; Han et al., 2022).

A pesar de los notables avances en la evaluación de la sostenibilidad urbana en la última década, aún persisten múltiples limitaciones para su evaluación (Han et al., 2022). Estas limitaciones pueden ir desde una falta de definición consensuada, pues no existe una metodología establecida o estandarizada, así como la falta de un marco teórico y conceptual en el uso de indicadores. Lo anterior ha contribuido en la generación de una plétora de indicadores, muchos de los cuales responden a necesidades particulares, pero que no

permiten su comparación entre ciudades. Por otro lado, pocas ciudades en el mundo han publicado estudios sobre sostenibilidad urbana, principalmente en países con economías emergentes (Marchetti et al., 2019).

Por lo anterior esta tesis propone abordar estas problemáticas dividiendo esta investigación en dos capítulos que se complementan entre sí. El primer capítulo, realiza una revisión de la sostenibilidad urbana a escala global, empleando un abordaje sistemático. El segundo capítulo se enfoca en evaluar la sostenibilidad urbana en la ciudad de San Luis Potosí, mediante la integración de herramientas espaciales y métodos analíticos para comprender y describir un escenario de sostenibilidad urbana en un contexto de una ciudad semi árida mexicana.

Objetivos

- Identificar y evaluar el estado actual del conocimiento en relación con las tendencias, métodos e indicadores empleados para la evaluación de la sostenibilidad urbana a escala global.
- Evaluar la sostenibilidad urbana de la ciudad de San Luis Potosí empleando herramientas de análisis espacial en la construcción de un índice de sostenibilidad urbano basado en atributos socioeconómicos, ambientales y biofísicos.

Hipótesis

La variación intrínseca de factores socioeconómicos y biofísicos modifican la calidad de vida de los habitantes, debido a una mala gestión urbana, existe una segregación socioeconómica en la ciudad, que marcan diferencias entre los indicadores socioeconómicos, ambientales e infraestructura urbana.

Referencias

- Acioly, Claudio., Vignol, Raphaelle., Jonsson, Asa., & UN-Habitat. (2020). *The New Urban Agenda illustrated*. ONU-Habitat.
- Alfonso Piña, W. H., & Pardo Martínez, C. I. (2016). Development and urban sustainability: An analysis of efficiency using data envelopment analysis. *Sustainability (Switzerland)*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/su8020148>
- Altamirano-Avila, A., & Martínez, M. (2021). Urban sustainability assessment of five Latin American cities by using SDEWES index. *Journal of Cleaner Production*, 287. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125495>
- Alvear, V. J. V., León, A. P. O., & Root, M. S. (2023). Urban sustainability in the Latin American intermediate city. The case of Loja - Ecuador. *Bitacora Urbano Territorial*, 33(3). <https://doi.org/10.15446/bitacora.v33n3.109577>
- Bhakti, T., Pena, J. C., Moura, A. C. M., Pujoni, D., Saliba, L., & Rodrigues, M. (2024). Urban biodiversity suitability index: decoding the relationships between cities and birds. *Urban Ecosystems*, 27(1), 305–319. <https://doi.org/10.1007/s11252-023-01446-5>
- Buzási, A., & Jäger, B. S. (2020). District-scale assessment of urban sustainability. *Sustainable Cities and Society*, 62. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102388>
- Cavoli, C. (2021). Accelerating sustainable mobility and land-use transitions in rapidly growing cities: Identifying common patterns and enabling factors. *Journal of Transport Geography*, 94. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2021.103093>

- Chamberlain, D., Reynolds, C., Amar, A., Henry, D., Caprio, E., & Batáry, P. (2020). Wealth, water and wildlife: Landscape aridity intensifies the urban luxury effect. *Global Ecology and Biogeography*, 29(9), 1595–1605. <https://doi.org/10.1111/geb.13122>
- Chao, A. L., Gallego, A. C., Lopez-Chao, V., & Alvarelllos, A. (2020). Indicators framework for sustainable urban design. *Atmosphere*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/atmos11111143>
- Cohen, M. (2017a). A systematic review of urban sustainability assessment literature. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 9, Issue 11). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su9112048>
- Cohen, M. (2017b). A systematic review of urban sustainability assessment literature. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 9, Issue 11). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su9112048>
- Contreras-Escandón, C. H. (2017). Superar la sostenibilidad urbana: Una ruta para América Latina. *Bitacora Urbano Territorial*, 27(2), 27–34. <https://doi.org/10.15446/bitacora.v27n2.62483>
- Corredor-Ochoa, Á., Antuña-Rozado, C., Fariña-Tojo, J., & Rajaniemi, J. (2020). Challenges in assessing urban sustainability. In *Urban Ecology: Emerging Patterns and Social-Ecological Systems* (pp. 355–374). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820730-7.00019-7>

- Duran-Encalada, J. A., & Paucar-Caceres, A. (2009). System dynamics urban sustainability model for Puerto Aura in Puebla, Mexico. *Systemic Practice and Action Research*, 22(2), 77–99. <https://doi.org/10.1007/s11213-008-9114-8>
- Ellili, N. O. D. (2024). Bibliometric analysis of sustainability papers: Evidence from Environment, Development and sustainability. In *Environment, Development and Sustainability* (Vol. 26, Issue 4, pp. 8183–8209). Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03067-6>
- Fang, X., Shi, X., Phillips, T. K., Du, P., & Gao, W. (2023). The Spatiotemporal Variation Characteristics of Urban Sustainability Based on the SDGs in Yangtze River Delta, China. *Buildings*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/buildings13081909>
- Ferreira, J. F. de C., Corrêa, J. M., & de Alcantara Junior, J. E. (2021). Sustainability assessment in the Brazilian Amazon: the municipalities of the state of Amapá. In *Environment, Development and Sustainability* (Vol. 23, Issue 11, pp. 15725–15738). Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01359-3>
- Foroozesh, F., Monavari, S. M., Salmanmahiny, A., Robati, M., & Rahimi, R. (2022). Assessment of sustainable urban development based on a hybrid decision-making approach: Group fuzzy BWM, AHP, and TOPSIS–GIS. *Sustainable Cities and Society*, 76. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103402>
- García, R. M., & Seguel, L. I. (2019). Urban sustainability: Analysis to scale neighborhood in The Temuco City, Chile. *Arquiteturarevista*, 15(1), 103–116. <https://doi.org/10.4013/arq.2019.151.06>

- Gulnara, N., Laura, K., Damira, T., & Madiyar, K. (2022). Sustainable urban development assessment: Large cities in Kazakhstan. *Urbani Izziv*, 33(1), 70–81. <https://doi.org/10.5379/urbani-izziv-en-2022-33-01-01>
- Hassanzadehkermanshahi, K., & Shirowzhan, S. (2022). Measuring Urban Sustainability over Time at National and Regional Scale for Addressing United Nations Sustainable Development Goal (SDG) 11: Iran and Tehran as Case Studies. *Sustainability (Switzerland)*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/su14127402>
- Hawken, S., Rahmat, H., Sepasgozar, S. M. E., & Zhang, K. (2021). The sdgs, ecosystem services and cities: A network analysis of current research innovation for implementing urban sustainability. *Sustainability (Switzerland)*, 13(24). <https://doi.org/10.3390/su132414057>
- Hicks, C. C., Levine, A., Agrawal, A., Basurto, X., Breslow, S. J., Carothers, C., Charnley, S., Coulthard, S., Dolsak, N., Donatuto, J., Garcia-Quijano, C., Mascia, M. B., Norman, K., Poe, M. R., Satterfield, T., Martin, K. S., & Levin, P. S. (2016). Engage key social concepts for sustainability. *Science*, 352(6281), 38–40. <https://doi.org/10.1126/science.aad4977>
- Huang, L., Wu, J., & Yan, L. (2015a). Defining and measuring urban sustainability: a review of indicators. In *Landscape Ecology* (Vol. 30, Issue 7, pp. 1175–1193). Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/s10980-015-0208-2>
- Huang, L., Wu, J., & Yan, L. (2015b). Defining and measuring urban sustainability: a review of indicators. In *Landscape Ecology* (Vol. 30, Issue 7, pp. 1175–1193). Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/s10980-015-0208-2>

- Jorge-Ortiz, A., Braulio-Gonzalo, M., & Bovea, M. D. (2023). Assessing urban sustainability: a proposal for indicators, metrics and scoring—a case study in Colombia. *Environment, Development and Sustainability*, 25(10), 11789–11822. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02554-6>
- Kaur, H., & Garg, P. (2019). Urban sustainability assessment tools: A review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 210, pp. 146–158). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.009>
- Khodakarami, L., Pourmanafi, S., Mokhtari, Z., Soffianian, A. R., & Lotfi, A. (2023a). Urban sustainability assessment at the neighborhood scale: Integrating spatial modellings and multi-criteria decision making approaches. *Sustainable Cities and Society*, 97. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104725>
- Khodakarami, L., Pourmanafi, S., Mokhtari, Z., Soffianian, A. R., & Lotfi, A. (2023b). Urban sustainability assessment at the neighborhood scale: Integrating spatial modellings and multi-criteria decision making approaches. *Sustainable Cities and Society*, 97. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104725>
- Kong, L., Liu, Z., & Wu, J. (2020). A systematic review of big data-based urban sustainability research: State-of-the-science and future directions. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 273). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123142>
- Li, F., Yigitcanlar, T., Nepal, M., Nguyen, K., & Dur, F. (2023). Machine learning and remote sensing integration for leveraging urban sustainability: A review and

- framework. In *Sustainable Cities and Society* (Vol. 96). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104653>
- Li, X., Lei, L., & Li, J. (2023). Integrating ecosystem service value into the evaluation of sustainable land use in fast-growing cities: A case study of Qingdao, China. *Ecological Indicators*, 153. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110434>
- Liang, X., Zhang, W., Chen, L., & Deng, F. (2016). Sustainable urban development capacity measure-A case study in Jiangsu Province, China. *Sustainability (Switzerland)*, 8(3). <https://doi.org/10.3390/su8030270>
- Liang, Y., Yi, P., Li, W., Liu, J., & Dong, Q. (2022). Evaluation of urban sustainability based on GO-SRA: Case study of Ha-Chang and Mid-southern Liaoning urban agglomerations in northeastern China. *Sustainable Cities and Society*, 87. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104234>
- Luo, X., & Huang, R. (2024). How to achieve sustainable development of smart city: a comprehensive bibliometric analysis. In *Clean Technologies and Environmental Policy*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s10098-024-02945-5>
- Malah, A., & Bahi, H. (2022a). Integrated multivariate data analysis for Urban Sustainability Assessment, a case study of Casablanca city. *Sustainable Cities and Society*, 86. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104100>
- Malah, A., & Bahi, H. (2022b). Integrated multivariate data analysis for Urban Sustainability Assessment, a case study of Casablanca city. *Sustainable Cities and Society*, 86. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104100>

- Marchetti, D., Oliveira, R., & Figueira, A. R. (2019). Are global north smart city models capable to assess Latin American cities? A model and indicators for a new context. *Cities*, 92, 197–207. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.04.001>
- Marvuglia, A., Havinga, L., Heidrich, O., Fonseca, J., Gaitani, N., & Reckien, D. (2020). Advances and challenges in assessing urban sustainability: an advanced bibliometric review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 124). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109788>
- Meijering, J. V., Tobi, H., & Kern, K. (2018). Defining and measuring urban sustainability in Europe: A Delphi study on identifying its most relevant components. *Ecological Indicators*, 90, 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.02.055>
- Merino-Saum, A., Halla, P., Superti, V., Boesch, A., & Binder, C. R. (2020). Indicators for urban sustainability: Key lessons from a systematic analysis of 67 measurement initiatives. In *Ecological Indicators* (Vol. 119). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106879>
- Michalina, D., Mederly, P., Diefenbacher, H., & Held, B. (2021). Sustainable urban development: A review of urban sustainability indicator frameworks. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 16). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/su13169348>
- Mithun, S., Sahana, M., Chattopadhyay, S., Chatterjee, S., Islam, J., & Costache, R. (2022). Comparative framework for spatially explicit urban growth modeling for monitoring urban land-use efficiency and sustainable urban development (SDG

- 11.3.1): a study on Kolkata metropolitan area, India. *Geocarto International*, 37(27), 17933–17970. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2136259>
- Morán, I. V., Martínez, S. A., Rejón, E. M. H., & Maya, J. R. C. (2023). Assessment of the multidimensional urban sustainability of the Puebla-Tlaxcala Metropolitan Area, Mexico. *Investigaciones Geográficas*, 112. <https://doi.org/10.14350/rig.60785>
- Mori, K., & Christodoulou, A. (2012). Review of sustainability indices and indicators: Towards a new City Sustainability Index (CSI). In *Environmental Impact Assessment Review* (Vol. 32, Issue 1, pp. 94–106). <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2011.06.001>
- Naciones Unidas. (2019). *World Urbanization Prospects 2018 Highlights*.
- Olawumi, T. O., & Chan, D. W. M. (2018). A scientometric review of global research on sustainability and sustainable development. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 183, pp. 231–250). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.162>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. In *The BMJ* (Vol. 372). BMJ Publishing Group. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>

- Peralta Arias, J. J. (2020). Sostenibilidad urbana en el contexto latinoamericano y en el europeo = Urban sustainability in the Latinoamerican and in the European context. *Cuadernos de Investigación Urbanística*, 131, 1. <https://doi.org/10.20868/ciur.2020.131.4465>
- Rajaonson, J., & Tanguay, G. A. (2017). A sensitivity analysis to methodological variation in indicator-based urban sustainability assessment: a Quebec case study. *Ecological Indicators*, 83, 122–131. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.07.050>
- Rama, M., González-García, S., Andrade, E., Moreira, M. T., & Feijoo, G. (2020). Assessing the sustainability dimension at local scale: Case study of Spanish cities. *Ecological Indicators*, 117. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106687>
- Ramadan, M. S., & Effat, H. A. (2021a). Geospatial modeling for a sustainable urban development zoning map using AHP in Ismailia Governorate, Egypt. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(2), 191–202. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.01.003>
- Ramadan, M. S., & Effat, H. A. (2021b). Geospatial modeling for a sustainable urban development zoning map using AHP in Ismailia Governorate, Egypt. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(2), 191–202. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.01.003>
- Rebolledo-Leiva, R., Vásquez-Ibarra, L., Feijoo, G., Moreira, M. T., & González-García, S. (2023). Determining key indicators for the assessment of sustainable development in Spanish cities under a multi-criteria approach. *Cleaner Production Letters*, 5, 100046. <https://doi.org/10.1016/j.clpl.2023.100046>

- Robert, J., Gouëset, V., Demoraes, F., Centeno, P. V., Pereyra, O., Flechas, A. L., Lucas, M., Luna, C. M., Moreno, M. M., Pardo, C. F., Rueda, J. A. P., Prieto, G., Acosta, H. S., & Villar-Urbe, J. R. (2022). Urban Structure and Mobility Conditions in the Popular Peripheries of Lima and Bogotá: Challenges and Method of Analysis. *Territorios*, 46. <https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/territorios/a.9942>
- Salles, A., Salati, M., & Bragança, L. (2023). Analyzing the Feasibility of Integrating Urban Sustainability Assessment Indicators with City Information Modelling (CIM). *Applied System Innovation*, 6(2). <https://doi.org/10.3390/asi6020045>
- Scherer, L., Behrens, P., de Koning, A., Heijungs, R., Sprecher, B., & Tukker, A. (2018). Trade-offs between social and environmental Sustainable Development Goals. *Environmental Science and Policy*, 90, 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.10.002>
- Shackleton, C. M., Hebinck, P., Kaoma, H., Chishaleshale, M., Chinyimba, A., Shackleton, S. E., Gambiza, J., & Gumbo, D. (2014). Low-cost housing developments in South Africa miss the opportunities for household level urban greening. *Land Use Policy*, 36, 500–509. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.10.002>
- Sharifi, A. (2021). Urban sustainability assessment: An overview and bibliometric analysis. In *Ecological Indicators* (Vol. 121). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107102>

- Shmelev, S. E., & Shmeleva, I. A. (2018). Global urban sustainability assessment: A multidimensional approach. *Sustainable Development*, 26(6), 904–920. <https://doi.org/10.1002/sd.1887>
- Soni, H., Yadav, R. K., & Patra, S. K. (2024). Global impact of urbanization on ecosystems: A comprehensive bibliometric analysis. *Natural Hazards Research*. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2024.04.001>
- Stossel, Z., Kissinger, M., & Meir, A. (2015). *Measuring the biophysical dimension of urban sustainability*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.10.010>
- Tanguay, G. A., Rajaonson, J., Lefebvre, J. F., & Lanoie, P. (2010). Measuring the sustainability of cities: An analysis of the use of local indicators. *Ecological Indicators*, 10(2), 407–418. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.07.013>
- Thondhlana, G., Mubaya, C. P., McClure, A., Amaka-otchere, A. B. K., & Ruwanza, S. (2021). Facilitating urban sustainability through transdisciplinary (Td) research: Lessons from Ghana, South Africa and Zimbabwe. *Sustainability (Switzerland)*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/su13116205>
- Valdivia-Loro, A. (2019). *Vista de Evaluación del índice de sostenibilidad urbana. Aplicación para Lima Metropolitana*.
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Wang, D., Dong, L., & Di, S. (2023). Data-driven comparison of urban sustainability towards sustainable urban development under sustainable development goals

- (SDGs): a review based on bibliometric analysis. In *Frontiers in Energy Research* (Vol. 11). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1168126>
- Winchester, L., Latina, A., & Caribe, E. (2006). Tema central Desafíos para el desarrollo sostenible de las ciudades en. In *Revista eure: Vol. XXXII*.
- Wu, M., Yan, B., Huang, Y., & Sarker, M. N. I. (2022). Big Data-Driven Urban Management: Potential for Urban Sustainability. In *Land* (Vol. 11, Issue 5). MDPI. <https://doi.org/10.3390/land11050680>
- Xie, Y., Liu, C., Chang, S., & Jiang, B. (2022). Urban Sustainability: Integrating Socioeconomic and Environmental Data for Multi-Objective Assessment. *Sustainability (Switzerland)*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/su14159142>
- Yang, B., Xu, T., & Shi, L. (2017). Analysis on sustainable urban development levels and trends in China's cities. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 141, pp. 868–880). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.121>
- Zeng, X., Yu, Y., Yang, S., Lv, Y., & Sarker, M. N. I. (2022). Urban Resilience for Urban Sustainability: Concepts, Dimensions, and Perspectives. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 14, Issue 5). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su14052481>
- Zhang, C., Sun, Z., Xing, Q., Sun, J., Xia, T., & Yu, H. (2021). Localizing indicators of sdg11 for an integrated assessment of urban sustainability—a case study of hainan province. *Sustainability (Switzerland)*, 13(19). <https://doi.org/10.3390/su131911092>
- Zhou, S., Li, W., Lu, Z., & Cheng, R. (2020). An ecosystem-based analysis of urban sustainability by integrating ecosystem service bundles and socio-economic-

environmental conditions in China. *Ecological Indicators*, 117.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106691>

Capítulo 1

Evaluación de la sostenibilidad urbana: Una revisión sistemática basada en análisis bibliométrico.

Artículo siguiendo el formato de la revista Environment, Development and Sustainability

Urban Sustainability Assessment: A Systematic Review based on bibliometric analysis

Saliha Barbosa-Martinez¹, Juan José Von Thaden Ugalde², Carlos Renato Ramos Palacio³,
Aura Ontiveros-Valencia⁴, Fredy Alvarado^{1,4*}

1 Laboratorio de Paisajes Antrópicos Sostenibles (LPAS), División de Ciencias Ambientales, Instituto Potosino de Ciencia y Tecnología (IPICYT) Camino a la Presa San José 2055, Lomas 4ta. Sección. San Luis Potosí 78216, S.L.P. México

2 Laboratorio de Planeación Ambiental, Departamento El Hombre y su Ambiente, Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco

3 Facultad del Hábitat, Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP)

4 División de Ciencias Ambientales, Instituto Potosino de Ciencia y Tecnología (IPICYT)

*Correspondence author: Fredy Alvarado: fredy.alvarado@ipicyt.edu.mx

Resumen

El crecimiento acelerado de las áreas urbanas, sumado a la falta de planificación, ha evidenciado la necesidad urgente de implementar estrategias multidisciplinarias para permitan mitigar los impactos negativos de la urbanización. No obstante, existen divergencias en los métodos de evaluación e incluso en las definiciones teóricas de sostenibilidad urbana, generando una falta de consenso y dificulta la implementación de estrategias coherentes y efectivas en este ámbito. En este sentido, el objetivo del presente estudio fue revisar de manera sistemática empleando un enfoque bibliométrico los métodos más comunes utilizados para evaluar la sostenibilidad urbana, así como identificar las categorías y dimensiones e indicadores empleados para evaluar la sostenibilidad urbana. Encontramos una amplia variedad en los indicadores de sostenibilidad urbana y una variación considerable en la publicación de artículos por país, lo que indica un sesgo geográfico pronunciado en su evaluación. A partir de estos hallazgos, el estudio presenta recomendaciones para futuras investigaciones centradas en la evaluación de la sostenibilidad

urbana, sugiriendo la adopción de métodos basados en sistemas de información geográfica y análisis espacial, con el fin de generar una comprensión más clara, integral y objetiva de la sostenibilidad en el entorno urbano.

1. Introducción

El acelerado e insostenible crecimiento de las ciudades es actualmente uno de los retos más importantes que enfrenta la humanidad (Cavoli, 2021). El acelerado desarrollo urbano, se ha convertido en un fenómeno global que transforma los hábitats naturales y la forma como nos relacionamos con el entorno natural (Acioly et al., 2020). Las tendencias de crecimiento de la población mundial indican que el futuro de la población será principalmente urbano (Naciones Unidas, 2019). En este contexto, comprender y cuantificar como podemos habitar ciudades cada vez más grandes sin comprometer los recursos necesarios para las generaciones futuras.

La población mundial alcanzó la cifra de 8.000 millones de habitantes en noviembre del 2022, y de acuerdo con cifras del banco mundial en 2023 el 56% de la población mundial vive en las ciudades, así mismo las tendencias indican que para el 2050 el 70% de la población mundial vivirá en las ciudades (Naciones Unidas, 2023). Debido a la alta concentración de población en las ciudades, estas producen una cifra cercana al 80% del PIB mundial. Sin embargo, las ciudades también representan aproximadamente dos tercios del consumo mundial de energía, representan más del 70% de las emisiones de gases de efecto invernadero y acumulan más del 60 % del uso de recursos (WorldBank, 2023; ONU, 2023).

Dada la creciente tendencia mundial hacia la urbanización, el análisis de la sostenibilidad de las ciudades se ha convertido rápidamente en un foco central en la investigación académica y el desarrollo de políticas públicas (Huang et al., 2015a; Wang et al., 2023), a medida que las ciudades de todo el mundo se enfrentan a los desafíos de equilibrar el desarrollo económico, la protección del medio ambiente y la equidad social (Sharifi, 2021), la implementación de estrategias basadas en sostenibilidad han aumentado exponencialmente (Chao et al., 2020), la investigación inicial sobre evaluación de la sostenibilidad urbana surgió a principios de la década de 1990. Desde su inicio, el campo ha experimentado un crecimiento sustancial, siendo testigo de una publicación anual de más de 300 artículos en los últimos años (Sharifi, 2021).

El origen conceptual de la sostenibilidad se remonta al club de Roma quienes publicaron “Los Límites Del Crecimiento” en 1972, en el cuál abordan las implicaciones del crecimiento exponencial desenfrenado. Sin embargo, fue hasta la Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente realizada en Estocolmo en 1972 que puso el medio ambiente en primer plano como un tema central. El informe Brundtland “Our Common Future”, se propuso la definición más consensuada de desarrollo sostenible: “El desarrollo sostenible es el desarrollo que satisfaga las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades” (Brundtland, G.H., 1987).

Para 1992 se destacó la necesidad de promover la sostenibilidad urbana en la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (Sharifi, 2021). Resultante de la Cumbre de Río se reconoce que es a escala local donde se enfrentan los desafíos ambientales. Adicionalmente para 2012 la Conferencia de las Naciones Unidas sobre

Desarrollo Sostenible Río+20 enfatizó las ciudades como uno de los principales ejes de acciones que debe priorizarse para la transición hacia el desarrollo sostenible (Sharifi, 2021). Paralelamente a estos avances, la creación de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible por las Naciones Unidas en 2015, se han convertido en un marco reconocido mundialmente para orientar y medir el progreso hacia la sostenibilidad. En consecuencia, el Objetivo de Desarrollo Sostenible 11, uno de los 17 objetivos globales, está directamente alineado con el desarrollo sostenible de las ciudades y las áreas urbanas.

Por consiguiente, la evaluación de la sostenibilidad urbana se ha vuelto cada vez más importante a medida que las ciudades y los sistemas urbanos han pasado a ocupar un lugar prioritario en la investigación y en la práctica. Sin embargo, su evaluación no es tan trivial como se ha de suponer y justamente la inclusión de distintos abordajes ha significado una creciente rama del conocimiento (Shmelev y Shmeleva, 2018).

Los esfuerzos concertados para lograr la sostenibilidad urbana subrayan la importancia de establecer objetivos, definir metas claras y monitorear el progreso hacia resultados urbanos sostenibles (Marvuglia et al., 2020). En este contexto, la evaluación de la sostenibilidad ofrece un marco valioso para definir y comprender mejor la agenda de sostenibilidad desde múltiples enfoques, incluido el ámbito del desarrollo urbano. No obstante, a medida que la literatura sobre este tema continúa expandiéndose rápidamente (Sharifi, 2021), diversos autores han señalado importantes brechas en su investigación e implementación (Cohen, 2017a; Marvuglia et al., 2020; Merino-Saum et al., 2020; Rama et al., 2020; Tanguay et al., 2010).

Se han publicado diversos artículos de revisión para consolidar e integrar el conocimiento actual sobre este tema, entre los que podemos mencionar estudios enfocados en la evaluación de indicadores de sostenibilidad urbana (Chao et al., 2020; Huang et al., 2015), marcos conceptuales y metodologías para la evaluación de la sostenibilidad (Cohen, 2017b). Mas recientemente el análisis de la sostenibilidad urbana con énfasis en los ODS (Wang et al., 2023), la evaluación de herramientas para la sostenibilidad urbana enfocada en el Big Data (Kong et al., 2020; Wu et al., 2022), y herramientas de evaluación de la sostenibilidad urbana (Kaur y Garg, 2019), que permiten integrar múltiples dimensiones temáticas para la evaluación de la sostenibilidad urbana (Michalina et al., 2021).

Precisamente, el trabajo de Corredor-Ochoa et al. (2020), destaca la importancia de indicadores cuantificables y adaptados a diferentes escalas urbanas, actores y etapas del ciclo de vida. Por otro lado, también existen revisiones que resaltan los retos que enfrentan ciudades en vía de desarrollo para evaluar la sostenibilidad urbana (Marchetti et al., 2019), resaltando el vacío en el conocimiento en relación con la sostenibilidad urbana para la mayoría de las ciudades Latinoamericanas.

Por otro lado, Mori y Christodoulou, (2012), realizan una discusión conceptual sobre los requerimientos para construir un índice de sostenibilidad urbana. En este sentido, diversos autores resaltan la importancia de la revisión sistemática de la sostenibilidad urbana, por ser una disciplina multifacética que permite identificar las técnicas de análisis bibliométricos permitiendo mapear la información disponible (Sharifi, 2021). Sin embargo, enfoques que integren indicadores claros y aplicados en diferentes contextos geográficos son aún limitados como lo resalta Cohen (2017).

Por último, el presente trabajo trata de integrar las principales lagunas en la investigación, por un lado, cuales son los alcances o limitaciones del estado del conocimiento actualmente, así como los marcos conceptuales y metodologías más importantes para evaluar la sostenibilidad urbana, por otro lado, enfocamos el análisis por contexto geográfico para identificar los países más desarrollados en el tema y cuales países o regiones geográficas presentan deficiencias en el desarrollo del conocimiento, así mismo la evaluación de indicadores de sostenibilidad y el análisis de dimensiones. Los alcances del presente trabajo son desafiantes sin embargo resulta importante un estudio integrador.

El análisis bibliométrico ha proporcionado una variedad de técnicas analíticas para explorar las interconexiones y asociaciones entre diversos elementos conceptuales y áreas de conocimiento (Hawken et al., 2021). Este tipo de análisis, se han convertido en una técnica cada vez más popular en la investigación sobre sostenibilidad dado el potencial para identificar tendencias de investigación, descubrir lagunas de conocimiento e informar futuras direcciones de investigación (Ellili, 2024; Sharifi, 2021; Wang et al., 2023). Sin embargo, su aplicación en el contexto del desarrollo urbano es aún incipiente (Ellili, 2024).

Por esta razón, este trabajo presenta una revisión sistemática de la literatura disponible en relación con la evaluación de la sostenibilidad urbana, con los siguientes objetivos: 1) identificar los métodos más comunes utilizados para evaluar la sostenibilidad urbana, 2) identificar las categorías y dimensiones más comunes para organizar los indicadores para evaluar la sostenibilidad urbana y 3) identificar las palabras claves más influyentes en la literatura, así como identificar que países o regiones han generado más conocimiento en relación a la sostenibilidad urbana.

2. Materiales y métodos

El análisis bibliométrico se realizó mediante herramientas informáticas para construir y visualizar redes bibliométricas. Asimismo, se utilizó el método PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses, Page et al., 2021). Mientras que para llevar a cabo el mapeo de vínculos entre conceptos científicos se empleó el software VOSviewer (<https://www.vosviewer.com/>).

2.1.Método PRISMA 2020

Este método implica una serie de pasos para identificar, seleccionar, evaluar críticamente y sintetizar toda la evidencia relevante disponible con respecto a una pregunta de investigación específica (Zeng et al., 2022). La metodología PRISMA, consiste en la identificación de los estudios relevantes a través de una búsqueda exhaustiva en bases de datos; la selección de los estudios que cumplen con los criterios de inclusión establecidos; la extracción de datos clave de los estudios seleccionados; la evaluación de la calidad metodológica y riesgo de sesgo de los estudios incluidos; y finalmente, la síntesis de los hallazgos de manera sistemática y transparente. PRISMA se compone de cuatro pasos principales: identificación, selección, elegibilidad e inclusión (Fig. 1), la metodología también incorpora una lista de verificación de 27 puntos que ayuda a orientar el procedimiento de revisión (Page et al., 2021).

2.2.Estrategia de búsqueda

La revisión de literatura entre el 1 de diciembre de 2023 y terminó el 31 de febrero de 2024. En la búsqueda sistemática se utilizaron las bases de datos de Web of Science (<https://clarivate.com>) y Scopus (<https://www.scopus.com>). El termino de búsqueda de palabras claves se realizó en inglés empleando la siguiente sintaxis:

"Urban sustainability" OR "sustainable urban development" AND city* OR indicator OR "case study" OR assessment OR "Sustainability index " OR "sustainable development"

2.3.Criterios de inclusión

Los criterios de inclusión de los artículos fueron los siguientes: 1) texto completo disponible, 2) que incluyera una descripción detallada de la manera en cómo se evaluó la sostenibilidad urbana, 3) contar con la evaluación de más de una dimensión de la sostenibilidad (ambiental, social y económica) y 4) artículos publicados en bases de datos indexadas.

2.4.Criterios de exclusión

Se excluyeron textos incompletos, y/o publicaciones en idiomas distintos del inglés, y literatura gris (aquella compuesta por tesis de grado o tesinas, resúmenes de congreso). También se excluyeron los artículos cuyo contenido solo analizaban un único indicador de sostenibilidad urbana como, por ejemplo: gestión del agua urbana, gobernanza, áreas verdes urbanas, etc., debido a que el presente análisis tiene por objetivo un análisis holístico de la sostenibilidad urbana. También los artículos que evaluaban la sostenibilidad desde el enfoque de una sola dimensión.

2.5.Flujo de búsqueda

Las bases de datos Web of Science (<https://clarivate.com>) y Scopus (<https://www.scopus.com/>) fueron empleados como principales motores de búsqueda. El método PRISMA, se compone de cuatro pasos principales: identificación, selección, elegibilidad e inclusión (Fig. 1). En total la búsqueda identificó 2,764 registros a partir de las dos bases de datos de búsqueda y la aplicación del término de búsqueda de palabras claves. Durante la selección se eliminaron 1,658 registros, estos artículos se eliminaron una vez

habiendo leído el título, quedando un total de 1,022 registro. Después en la etapa de elegibilidad se obtuvieron 1,022 artículos, los cuales se leyó el resumen del documento para saber si el artículo cumplía con los criterios de selección. A partir de esta revisión se identificaron 52 artículos duplicados, después los artículos cuyo contenido solo analizan un único indicador de sostenibilidad urbana con un total de 356 artículos, artículos que analizan la sostenibilidad urbana desde una solo dimensión: 376 y 122 artículos sin texto completo. Para contar con un total de 116 documentos en la etapa de inclusión (Fig. 1), cada uno se leyó en su totalidad para analizar la evaluación de la sostenibilidad urbana, y las principales características de los estudios, las cuales se describen en la sección de resultados.

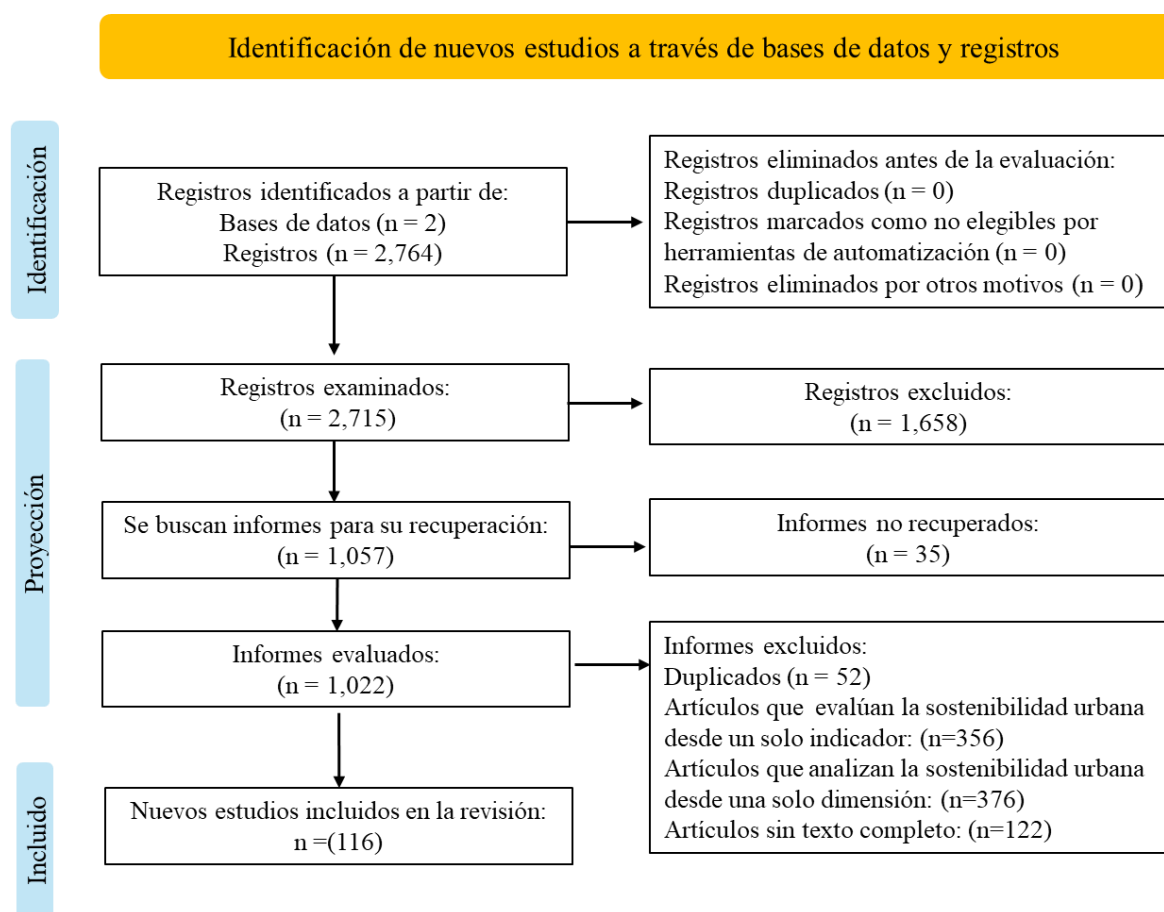


Figura 1. Selección de documentos guiada por el enfoque PRISMA.

2.6. Análisis bibliométrico usando Vosviewer

El análisis bibliométrico se realizó a través de la plataforma VOSviewer (VOSviewer 1.6.20), (<https://www.vosviewer.com/>), el cual permitió la construcción y visualización de redes de co-ocurrencia de palabras claves extraídas de los artículos seleccionados (van Eck y Waltman, 2010). Para identificar las palabras clave más frecuentes se analizaron los metadatos de los documentos seleccionados.

VOSviewer crea una matriz de co-ocurrencia, que muestra un mapa bidimensional de todos los elementos agrupados en función de sus medidas de similitud, cuanto más fuertes sean los vínculos entre los elementos reportados en la matriz, más cerca estarán ubicados (van Eck y Waltman, 2010). Los nodos son los círculos que representan las palabras claves, el tamaño de los nodos refleja su frecuencia o relevancia en la literatura. Los nodos más grandes son más influyentes o mencionados con mayor frecuencia.

3. Resultados

3.1. Enfoque geográfico.

La Figura 2 describe la distribución geográfica de la literatura actual sobre sostenibilidad urbana, en esta figura podemos observar que China es el país con mayor número de artículos (32 % del total de artículos publicados). Sin embargo, a pesar del aumento en el número de artículos en el continente asiático, las publicaciones se concentran en la región de Asia del sur, Asia occidental y Asia Central (India, China, Irán, Irak y Arabia Saudita) (Fig. 2).

En el continente Europeo, se observa una mayor concentración de artículos por país en comparación con el resto del mundo, representando un 17% del total de artículos publicados. En donde el mayor número de artículos se observa para España, Hungría y Alemania, los cuales acumulan el 8% del total de trabajos publicados.

Por otro lado, el continente americano cuenta con el 14% del total de artículos (Fig. 2). Es importante notar que se presenta un bajo número de artículos publicados en norte América (Canadá y Estados Unidos). Por otro lado, en Latino América, Colombia, Brasil, Argentina y México son los países que acumulan investigaciones publicadas sobre sostenibilidad urbana. (Fig. 2).

En contraste el continente africano cuenta con muy poca generación de conocimiento sobre sustentabilidad urbana (3% del total de artículos), solo se mencionan 4 países en la literatura (Egipto, Etiopía, Kenia y Nigeria), en donde los trabajos publicados fueron realizados únicamente en sus ciudades capitales

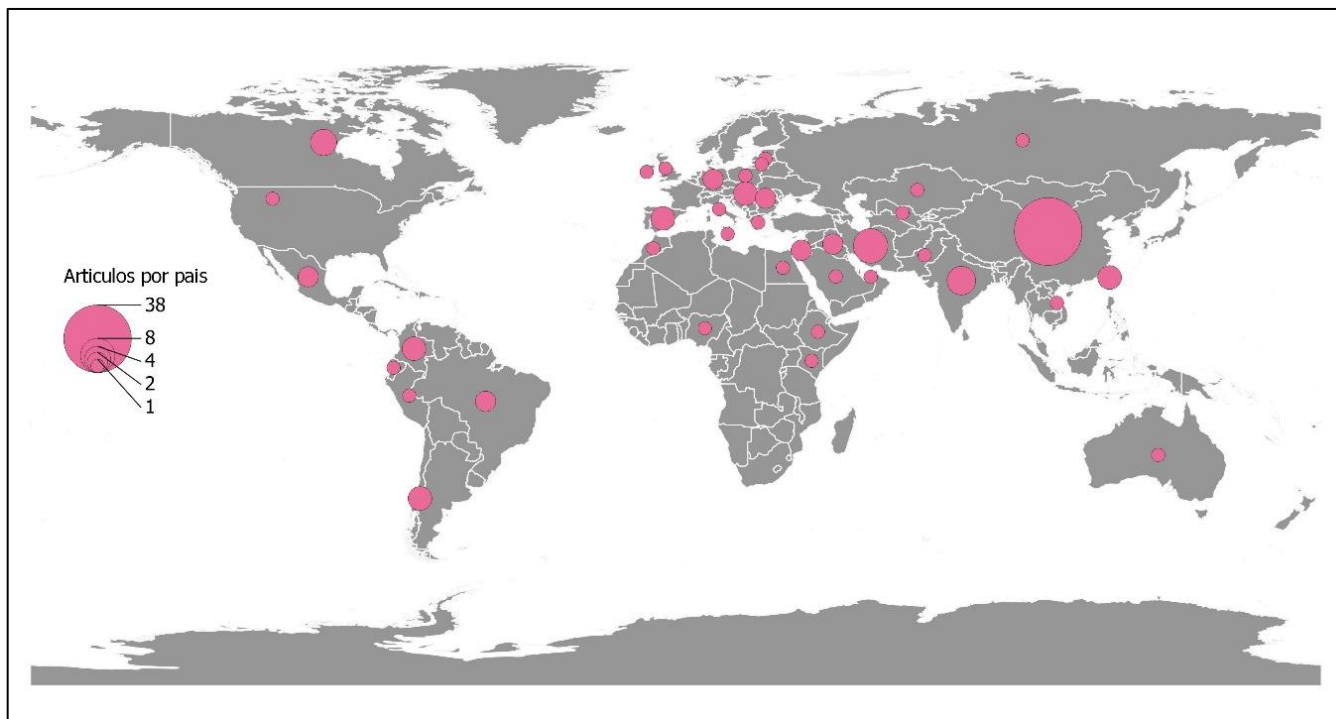


Figura 2. Artículos publicados sobre Evaluación Sostenibilidad Urbana por país. Los círculos rosas indican la ubicación geográfica de los trabajos y el tamaño del círculo es proporcional al número de artículos publicados.

3.2. Artículos por año de publicación

En la Figura 3, se puede observar que los estudios sobre la evaluación de la sostenibilidad urbana han aumentado de manera constante desde su primera publicación en 1998. Se observa un crecimiento de la investigación, de 2 artículos publicados en 2010, paso a 11 publicaciones en 2017, y aproximadamente se duplicaron en 2022 con 20 estudios (Fig. 3). Es importante resaltar que en 2018 la investigación sufrió un descenso en los estudios sobre el tema, sin embargo, para el siguiente año en 2019 la producción científica aumento con 12 publicaciones.

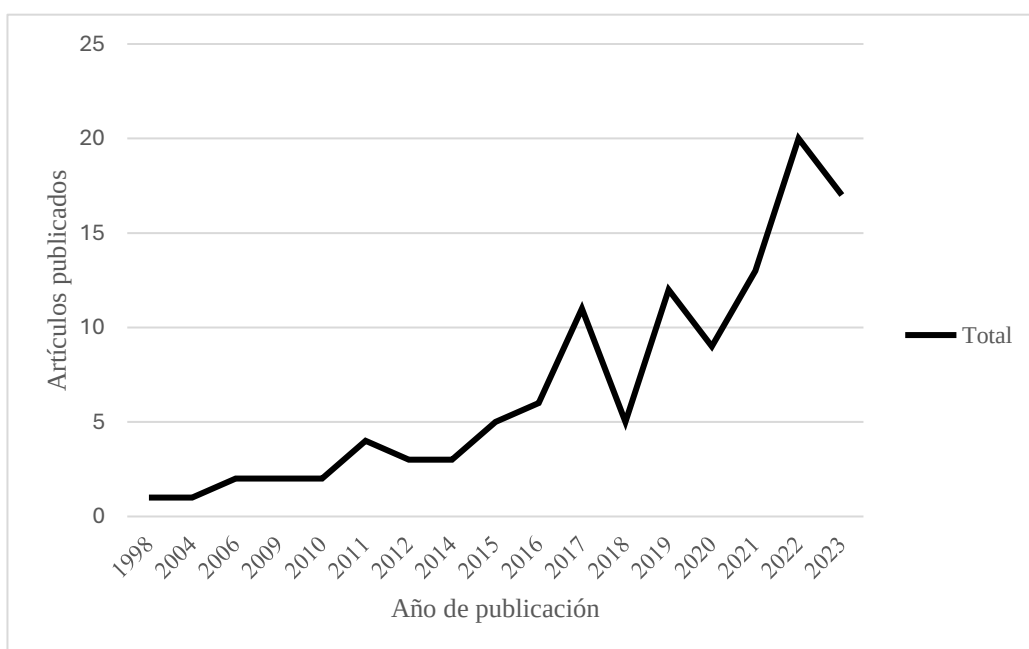


Figura 3. Artículos por año de publicación.

3.3. Metodologías de Evaluación de la Sostenibilidad Urbana

En base a la revisión de la literatura, se identificaron 53 metodologías empleadas en la literatura para la evaluación de la sostenibilidad urbana. El sistema de calificación basado en indicadores es el marco metodológico más utilizado (84 menciones en la literatura), y el

marco de referencia orientado a índices de sostenibilidad es el segundo con mayor mención en la literatura (28 menciones en la literatura), otra metodología ampliamente utilizada en los estudios, son los marcos de modelización espacial (13 menciones en la literatura). En la Tabla 1 se muestra un resumen de los marcos teóricos más utilizados en la literatura.

Tabla 1. Metodologías de evaluación de la sostenibilidad urbana de la literatura.

Metodología	Menciones en la literatura
Sistemas de calificación de la sostenibilidad basados en indicadores	84
Marcos orientados a índices de sostenibilidad	28
Marco de la modelización espacial	13
Análisis de componentes principales (PCA)	8
Toma de decisiones multicriterio (MCDM)	8
Proceso analítico jerárquico (AHP)	7
Análisis envolvente de datos (DEA)	6
Lógica difusa	6
Método de ponderación de entropía	4
Correlación de Pearson	4
Técnica de preferencia de orden por similitud con la situación ideal (TOPSIS)	4

3.4. Dimensiones de sostenibilidad urbana

A continuación, se describe las dimensiones de la sostenibilidad mencionadas en la revisión, el análisis se basó, en evaluar la representación de las dimensiones de la sostenibilidad en la literatura (Fig. 4).

Se observa que el eje con la mayor cantidad de artículos es para solo categorías temáticas con 57 (49 % del total de artículos), esta clasificación incluye aquellos artículos que agrupan los indicadores en distintas dimensiones, estas dimensiones no se pueden agrupar en la

sostenibilidad clásica de los tres ejes (ambiental, social y económico), amplían en muchos casos el número de dimensiones y por consecuencia son artículos con un mayor número de indicadores y presentan una gran variación en la cantidad de indicadores utilizados (el número de indicadores puede variar desde 8 hasta 120). El siguiente eje con el mayor número de artículos es la sostenibilidad clásica con 25 documentos, el cual representa el 21% del total de los estudios.

Del total de documentos seleccionados, 15 artículos se caracterizan por cuatro dimensiones (13%). Estos artículos tienden a incluir “recursos” (7 estudios) e “institucional” (3 estudios) como cuarta dimensión. En cambio, para los artículos que utilizan 5 dimensiones, existe una amplia variedad de dimensiones utilizadas, sin que se observe un consenso claro. Estas pueden abarcar indicadores ambientales hasta tecnológicos.

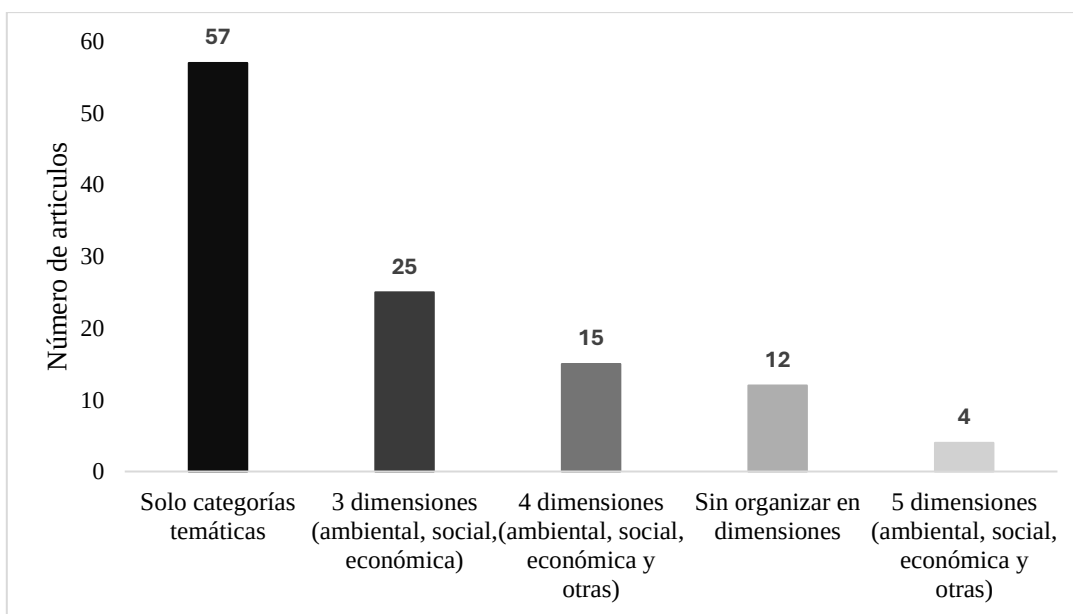


Figura 4. Organización de las dimensiones de sostenibilidad urbana.

3.5. Número de indicadores por dimensiones

Del análisis anterior se consideraron únicamente los artículos que evalúan la sostenibilidad urbana a partir de 3, 4 y 5 dimensiones. A continuación, se describe el número de indicadores que contiene cada dimensión.

En la Figura 5 se muestra que el número de indicadores para las dimensiones de sostenibilidad urbana no están distribuidos homogéneamente pero tampoco se observa una tendencia significativamente diferente entre el número de indicadores de las dimensiones. Para el análisis de los indicadores que evalúan la sostenibilidad urbana en base a tres dimensiones (dimensión clásica), los indicadores económicos presentan un total del 28% de los indicadores correspondientes a esta categoría, la dimensión social representa un 38% de los indicadores, mientras que la dimensión ambiental representa un 34% de los indicadores utilizados.

Los artículos que describen la sostenibilidad urbana para 4 dimensiones, el 23% del total de los indicadores corresponden al área económica, 28% para el social, 29% para el ambiental y por último otros representa un 21% de los indicadores utilizados en esos artículos. Para los artículos con 5 dimensiones, económico representa un 19.8% de indicadores, social 19.8%, ambiental 26 % y otros con de 33 %. El análisis anterior permite conocer si existe alguna dimensión que contenga una mayor cantidad de indicadores que otra.

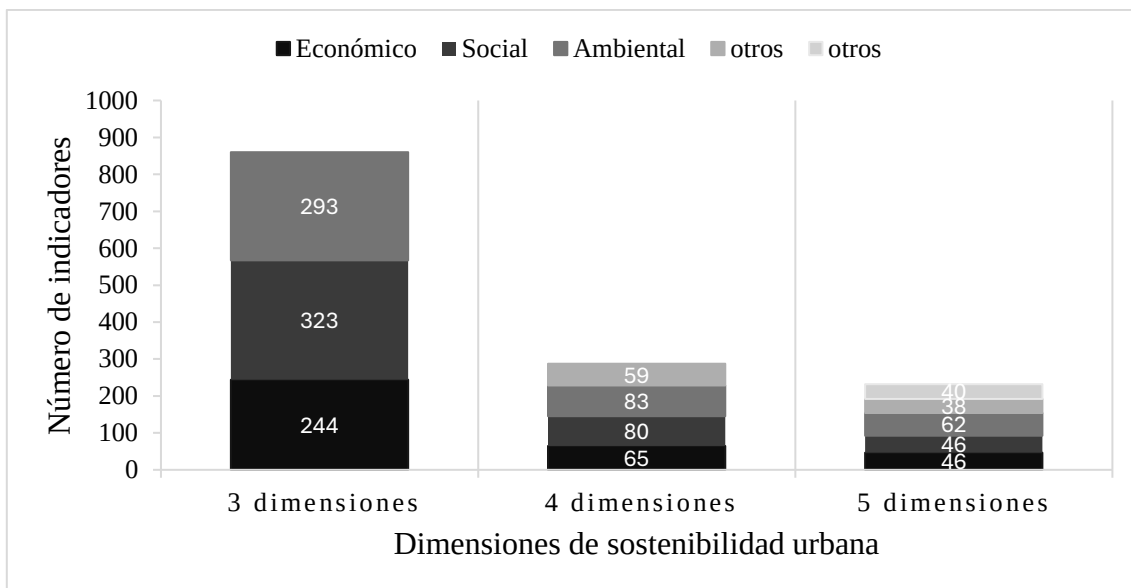


Figura 5. Número de indicadores por dimensiones

3.6. Análisis de palabras claves

El análisis de co-ocurrencia de las palabras clave mostro que para que una palabra se visualice en el análisis tiene que haber sido mencionada un mínimo de 5 veces en las palabras claves de los artículos (Fig. 6). El cluster principal (rojo), es el cluster con el mayor número de palabras claves (14). Este presenta dos palabras claves (indicator y urban sustainability) ampliamente utilizadas en la literatura debido a que se observa un mayor número de conexiones, presenta términos como urbanization, cities, sustainability indicators, enviroment, urban sustainability assessment, los cuales están conectados principalmente con los temas de evaluar la sostenibilidad urbana a través de indicadores en ciudades. También los términos frameworky system puede indicar los aspectos metodológicos, marco teórico y fundamentos para evaluar la sostenibilidad urbana

El segundo cluster (verde) con 11 palabras claves, entre las que destacan por un lado términos como GIS, spatial analysis, urban grow, muestran la fuerte relación que existe entre los

sistemas de información geográfica como herramienta para el conocimiento urbano de la sostenibilidad. Por otro lado, tenemos decision making, economic and social effects, urban development y sustainable development, se pueden atribuir a los efectos sociales y económicos en el desarrollo sostenible.

Por último, el cluster azul con 7 palabras claves, el termino sustainable urban development, aparece como concepto central de la nube de ocurrencia, esto indica una fuerte relación entre los demás conceptos y el termino de desarrollo urbano sostenible. Las fuertes conexiones que existen entre China y términos como pollution, y sustainable urban development, muestra la creciente preocupación por el desarrollo urbano sostenible a consecuencia de su alto grado de contaminación. Conceptos como index y model indican que este país se ha caracterizado por desarrollar modelos, índices de sostenibilidad urbana. En general el cluster azul es sobre enfoques metodológicos e índices.

4. Discusión

El análisis de la sustentabilidad urbana requiere un enfoque multidisciplinar y un abordaje que permita el aporte de nuevos conocimientos sobre los principales mecanismos, métodos y herramientas empleadas en el estudio de la sustentabilidad en distintas ciudades del mundo. Los hallazgos obtenidos de la revisión sistemática realizada, resaltan que: 1) El conocimiento de los mecanismos que promueven la sostenibilidad urbana son bien conocidos, pero no se han realizado estudios en la gran mayoría de ciudades del planeta , 2) Se identificó un mayor uso de los indicadores ambientales y sociales, en comparación con los económicos, 3) Cada vez existe un mayor número de dimensiones en la literatura para evaluar la sostenibilidad urbana, 4) Se destaca la ausencia de la dimensión clásica (ambiental, social y económico) en varios estudios cuando se analiza la sostenibilidad urbana y 5) Nuestros resultados resaltan que la mayoría de los estudios de sostenibilidad urbana utilizan la suma de más de una metodología y vale la pena señalar que no existe consenso entre los autores sobre el uso de una metodología o marco específico para evaluar la sostenibilidad urbana. Estos resultados pueden ayudarnos a comprender los principales vacíos y áreas de oportunidad en la investigación sobre sostenibilidad urbana, proponiendo nuevas direcciones y enfoques que permitan abordar de manera más integral los desafíos que enfrenta la humanidad.

4.1. Enfoque geográfico

El mayor sesgo observado en la generación de conocimiento sobre sostenibilidad urbana es el continente africano, donde la presencia de estudios de sostenibilidad urbana es prácticamente inexistente, solo cuentan con 4 artículos encontrados en esta revisión. De acuerdo con Thondhlana y colaboradores, (2021), reconocen los desafíos de la investigación sobre sostenibilidad urbana en África, incluida la literatura dispersa y las limitaciones de recursos. Estos autores concluyen que los obstáculos que enfrenta tienen el potencial de poner en peligro el logro de los objetivos de desarrollo urbano, inclusive los autores plantean la dificultad real de alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible propuestos por la ONU en la mayoría de los países africanos. Precisamente, esto puede estar asociado con deficiencias importantes en su infraestructura urbana, caracterizadas por pronunciadas desigualdades en los niveles de progreso entre regiones (Shackleton et al., 2014; Thondhlana et al., 2021). Sin embargo, al presentar retos importantes existen áreas de oportunidad, enfatizando en desarrollar soluciones contextualmente relevantes, que logren ser adaptables a las ciudades africanas.

De manera similar, en América Latina, las investigaciones sobre la sostenibilidad urbana son limitadas, se encuentran estudios dispersos, entre los que destacan países como Colombia (Alfonso Piña & Pardo Martínez, 2016; Jorge-Ortiz et al., 2023), México (Duran-Encalada & Paucar-Caceres, 2009), Brasil (Ferreira et al., 2021), Ecuador (Alvear et al., 2023). En estudios recientes encontramos la investigación de Peralta Arias (2020), en su trabajo destaca que los países con mayor desarrollo de indicadores de sostenibilidad urbana son: México, Chile, Colombia, Costa Rica y Brasil, además resalta la desigualdad regional en el desarrollo de la investigación. No obstante, los autores resaltan que, a pesar de estar aumentando el

número de trabajos sobre sostenibilidad urbana, estos se enfocan principalmente en ciudades capitales, dejando de lado la mayoría de las ciudades Latinoamericanas. De igual manera estos trabajos publicados resaltan que la desigualdad en el desarrollo de la investigación regional es una característica común que comparten los países de América Latina y África.

Respecto a las iniciativas en América latina, organizaciones internacionales como: la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), han impulsado iniciativa y apoyo, que han contribuido al desarrollo de programas nacionales (Contreras-Escandón, 2017; Peralta Arias, 2020). Sin embargo, un problema identificado es la falta investigación a nivel subnacional, si bien las iniciativas ayudan a la formación de una estructura densa en la investigación, se observa una falta de estructura a nivel local, la cual podría ser una de las mayores diferencias con los países desarrollados, traduciéndose a unos de los retos cruciales que enfrentan las ciudades Latinoamericanas.

Marchetti y colaboradores (2019), en su artículo se plantean la pregunta: ¿Son los modelos de ciudades inteligentes del norte global capaces de evaluar a las ciudades latinoamericanas?, destacan los desafíos que presentan las ciudades latinoamericanas, argumentan que la solución no es reproducir metodologías adoptadas por países desarrollados. Los autores proponen que se necesitan soluciones que se adapten a los contextos latinoamericanos. Además Altamirano-Ávila y Martínez, (2021) plantean que, debido a la falta de información disponible, es más plausible la recolección o construcción de una base de datos con relación a un marco de desarrollo de evaluación de la sostenibilidad urbana.

Por otro lado, el contexto de las ciudades europeas es diferente, han estado a la vanguardia del desarrollo urbano sostenible en muchos sentidos (Meijering et al., 2018). Diversos

trabajos apuntan que el desarrollo metodológico de la evaluación de la sostenibilidad urbana proviene de Europa (Corredor-Ochoa et al., 2020; Marchetti et al., 2019; Peralta Arias, 2020). Además Luo y Huang, (2024), argumentan que la ubicación geográfica influye significativamente en la forma en que se lleva a cabo la colaboración en esta región. Por otro lado, los hallazgos de Olawumi y Chan, (2018), indican un alto grado de avance en la investigación y el desarrollo dentro del campo de los estudios de sostenibilidad en varios países europeos (Reino Unido, Alemania, Países Bajos, y Suecia).

En su trabajo, Wang y colaboradores, (2023) destacan de forma inequívoca la productividad académica de las universidades europeas. Asimismo, Sharifi, (2021), identifica explícitamente a varias ciudades europeas, a Estados Unidos y a China como actores dominantes en este campo. Sumado a lo anterior, en el trabajo de Soni et al., (2024) analizan los patrones más destacados de la investigación sobre sostenibilidad en todo el mundo y los resultados del análisis bibliométrico de series temporales de palabras claves, arrojaron que Europa es uno de los términos que aparece con más frecuencia.

Se destaca que en el presente trabajo China fue el país con el mayor número de trabajos publicados (38 artículos) en la presente investigación, diversos trabajos lo posicionan como el país con más publicaciones (Luo & Huang, 2024; Sharifi, 2021; Soni et al., 2024). Incluso en la Figura 6 del análisis de palabras claves, China se posiciona como un término relevante en la investigación. Por consiguiente, surge la pregunta ¿que hace que china sea el país con el mayor número de publicaciones?, resaltan los siguientes puntos: las universidades chinas son más productivas que otras en términos de publicaciones (Wang et al., 2023), por otro lado Olawumi y Chan, (2018), mencionan que China es uno de los países donde existe una fuerte colaboración internacional entre autores. Sumado a lo anterior Soni y colaboradores,

(2024), coinciden con lo antes mencionado en sus resultados, muestran que el país con el mayor número de publicaciones es China, también exponen que la Academia China de Ciencias es la institución con el máximo número de citas.

4.2. Artículos por año de publicación

Con base en los resultados de la Figura 3 se observa una tendencia al aumento de artículos desde la publicación del primer artículo en 1998, existe un incremento significativo en la publicación de artículos que evalúan la sostenibilidad urbana en las ciudades a partir de 2015.

Diversos factores se atribuyen a esta tendencia entre los que destacan la publicación de los ODS en 2015, en 2016 se relación con la adopción de la nueva agenda ambiental de la ONU, así como la continuidad anual de esta agenda, por otro lado, como menciona Sharifi, (2021), la integración en el IPCC de evaluaciones a escala de ciudad en 2014, a partir de lo anterior se reconoce cada vez más las ciudades como eje fundamental para lograr la sostenibilidad.

Los resultados concuerdan con Sharifi, (2021), dividen la tendencia de publicación en cuatro periodos, y reconocen el rol de las ciudades para lograr los objetivos de desarrollo sostenible. En Li y colaboradores, (2023) observan que en 2017 el número de artículos comenzó a incrementar, para duplicar su nivel en 2019. Sumando a lo anterior, Ellili, (2024) el número de documentos publicados comenzó a aumentar significativamente en el periodo de 2018 y 2019. Por otro lado, en Kong y colaboradores, (2020) los resultados mostraron que se incrementó exponencial desde 2012 y 2018.

4.3. Metodologías utilizadas

En el presente trabajo identificamos 53 metodologías que se han utilizado en la literatura. Se destaca que la mayoría de los estudios de sostenibilidad urbana utilizan la suma de más de una metodología. Vale la pena señalar que no existe consenso entre los autores sobre el uso de una metodología o marco específico para evaluar la sostenibilidad urbana. Sin embargo, se observa que ciertas metodologías sobresalen en la literatura, descritas a continuación. Por ejemplo, el marco más utilizado en la literatura como era de esperarse es la evaluación de la sostenibilidad urbana en base a la medición de indicadores (84 menciones en la literatura), después los marcos orientados a índices de sostenibilidad (28 menciones en la literatura), las metodologías que integran los sistemas de información geográfica (13 menciones en la literatura), son herramientas espacialmente explícitas que utilizan datos geoespaciales para la construcción de indicadores (Bhakti et al., 2024; Chao et al., 2020; Foroozesh et al., 2022; Khodakarami et al., 2023a; Morán et al., 2023), los análisis estadístico como el análisis de componentes principales (PCA) (Fang et al., 2023; X. Liang et al., 2016; Xie et al., 2022) y Correlación de Pearson (Malah & Bahi, 2022a) y toma de decisiones multicriterio (MCDM) (Khodakarami et al., 2023b; Ramadan & Effat, 2021a).

Los resultados concuerdan con los hallazgos de Cohen, (2017), donde los artículos de la revisión literaria emplean en mayor medida los marcos orientados a indicadores o índices. De acuerdo con Salles y colaboradores, (2023), al contar con métodos tan diversos, se enfrenta con el problema de que cada método presenta un énfasis diferente, que puede ser tanto cualitativo como cuantitativo, la discrepancia puede ser desde el tipo de indicadores como en las ponderaciones. Sumado a lo anterior Kaur y Garg, (2019), realizan una revisión literaria sobre las herramientas de evaluación de sostenibilidad urbana y argumentan que las

metodologías destacan ciertas dimensiones más que otras, como la infraestructura y la gestión de recursos, dejando de lado otros, como cultura, concluyendo que las herramientas analizadas no reflejan las asociaciones complejas entre las dimensiones. Tras la discusión anterior, las ciudades se enfrentan al reto de estandarizar los análisis e identificar puntos en común entre ellas para desarrollar una metodología conjunta capaz de evaluar la sostenibilidad urbana adaptada al contexto particular de cada ciudad. A pesar de su complejidad, los principios básicos de la sostenibilidad se basan en un enfoque integrado por lo cual es determinante integrar los métodos e indicadores actualmente existentes para evaluar la sostenibilidad urbana.

Por lo anterior y a partir de la revisión de las metodologías mencionadas en la literatura la mejor forma de integración es la utilización de dos o más metodologías que se adapten a los alcances del contexto que se pretende evaluar.

4.4. Dimensiones de la sostenibilidad

Esta investigación proporciona una revisión oportuna de la literatura sobre las categorías para organizar los indicadores de sostenibilidad por dimensiones, uno de los puntos más señalados en la literatura es la carencia de un marco unificador (Cohen, 2017a; Mori y Christodoulou, 2012; Sharifi, 2021; Zeng et al., 2022). Por otro lado, Zhou y colaboradores, (2020), resaltan la complejidad de los sistemas urbanos, la necesidad de considerar múltiples dimensiones e interacciones al analizar la sostenibilidad urbana, donde no se menciona de primera mano la falta de un marco unificador, pero si respaldan la importancia de un enfoque integrado. Esta revisión de la literatura disponible destaca la importancia de considerar el equilibrio y la interconexión entre las diferentes dimensiones de la sostenibilidad a la hora de desarrollar marcos de evaluación de la sostenibilidad urbana (Chao et al., 2020; Michalina et al., 2021).

En nuestro estudio se encontraron 57 artículos que presentan la característica que los indicadores no se encuentran dividido en dimensiones (Fig. 4), los indicadores pueden presentarse en temas muy generales, lo anterior indica que, si bien no existe un conjunto de indicadores de sostenibilidad de aplicación general, para Stossel y colaboradores, (2015), la selección de métricas específicas para cada tema debe adaptarse a los datos disponibles, que pueden variar en distintos contextos urbanos.

Nuestra revisión resalta que la dimensión clásica presento 25 artículos, seguido de los artículos con de 4 dimensiones con 15 artículos, después los estudios que no presentan organización en dimensiones, y por último los artículos con 5 dimensiones con 4 resultados. Estos resultados son similares a los encontrados por Cohen (2017b) y Michalina et al. (2021), donde la gran parte de los artículos de la revisión de esos análisis los indicadores no se organizan explícitamente en dimensiones, sin embargo, para Michalina y colaboradores, (2021) esto no disminuye inherentemente su relevancia en el contexto de la sostenibilidad porque las categorías temáticas y los indicadores se integran de manera equilibrada. Sin embargo, sumado a lo anterior podemos destacar que si bien la mayoría de los estudios analizados en este trabajo, no se encuentran dividido en las dimensiones clásicas de sostenibilidad (ambiental, social y económica), surge la pregunta si verdaderamente podrían llegar a ser considerado como estudios de sostenibilidad urbana al no contar con las dimensiones. De acuerdo con Cohen, (2017), si la mayoría de los autores deciden no utilizar los tres pilares de la sostenibilidad, tal vez consideran que resulta un marco reduccionista, pudiendo llegar a ser ambiguo para plantear soluciones a los problemas que enfrentan las ciudades. Al dividir estas dimensiones en indicadores mensurables, este trabajo ofrece un

marco valioso para que investigadores y formuladores de políticas que evalúen los esfuerzos de sostenibilidad urbana dentro de las ciudades.

4.5. Numero de indicadores por dimensiones

El análisis del número de indicadores (Fig. 5) en las diferentes dimensiones sugiere una representación relativamente equilibrada, aunque se hace más hincapié en los factores sociales y ambientales en comparación con las dimensiones económicas. De acuerdo con Hicks y colaboradores, (2016) argumentan que existen más datos disponibles para medir indicadores sociales y ambientales que económicos.

Por otro lado, los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas ponen énfasis en dimensiones como la inclusión social y la sostenibilidad de acuerdo con Merino-Saum y colaboradores, (2020). Este énfasis en factores sociales y ambientales puede deberse a varias razones, Scherer y colaboradores, (2018), argumentan la creciente conciencia pública sobre cuestiones críticas de sostenibilidad como el cambio climático, la contaminación y la desigualdad social ha impulsado el desarrollo de indicadores para medir estos dominios; puede haber más datos disponibles para cuantificar las métricas sociales y ambientales en comparación con las económicas y los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas han destacado la importancia de la inclusión social y la sostenibilidad ambiental como pilares clave del desarrollo sostenible. La literatura destaca la importancia de considerar un equilibrio e interconexión entre las diferentes dimensiones de la sostenibilidad al desarrollar marcos de evaluación de la sostenibilidad urbana.

4.6. Palabras claves

El análisis de palabras clave en este estudio proporciona una visión general de las áreas de enfoque en la investigación de la sostenibilidad urbana (Ellili, 2024; Wang et al., 2023). Los resultados muestran que los estudios se han centrado principalmente en la evaluación de la sostenibilidad urbana a través de indicadores (Jorge-Ortiz et al., 2023; Merino-Saum et al., 2020; Mori & Christodoulou, 2012; Rajaonson & Tanguay, 2017).

Si bien existen revisiones como las de Cohen, (2017), donde concuerdan que los métodos más comunes en la evaluación de la sostenibilidad urbana son a través de indicadores, el autor argumenta que podría no ser la opción más integradora, ya que los indicadores presentan limitaciones como; la reducción de la complejidad y dificultad para capturar la dinámica temporal. Por lo anterior nosotros sugerimos la integración de marcos basados en los sistemas de información geográfica, si bien ya existen en la literatura como herramienta para la planeación urbana, cada vez existen una mayor cantidad de autores que integran los SIG para evaluar la sostenibilidad urbana (Bhakti et al., 2024; Buzási & Jäger, 2020; Malah & Bahi, 2022b). Además, la presencia de términos como "GIS", "Spatial analysis" "Sustainable development" "Urban areas/urban development/ urban grown" indican el papel clave que juegan los enfoques metodológicos y las herramientas de análisis espacial en el estudio de la sostenibilidad urbana (Foroozesh et al., 2022; Gulnara et al., 2022; Khodakarami et al., 2023b)

Por otro lado, Hawken y colaboradores., (2021), utilizaron un análisis de co-ocurrencia de palabras claves para visualizar las relaciones entre los conceptos claves en la literatura sobre los ODS. El análisis reveló que "ciudades sostenibles" era el grupo de términos más grande y central en la red, lo anterior señala que la sostenibilidad urbana es tema central en la

investigación para lograr el cumplimiento de los ODS. Un aspecto interesante es la fuerte relación entre los términos "desarrollo urbano sostenible" y "contaminación", lo que sugiere una importante preocupación por los impactos ambientales del crecimiento urbano, particularmente en el contexto de países como China que han experimentado un rápido proceso de urbanización (X. Li et al., 2023; Y. Liang et al., 2022; Yang et al., 2017). También destaca la presencia de China como único país en la nube de palabras claves, lo cual concuerda con los resultados del número de artículos por país (Fig. 2), en el cual China es el país con el mayor número de artículos publicados. Para Chao y colaboradores, (2020), los resultados destacan la naturaleza interdisciplinaria de la sostenibilidad urbana y la interconexión de varias disciplinas para lograr la sostenibilidad urbana.

5. Conclusión

En el presente estudio se realizó una revisión exhaustiva de la literatura en términos de evaluación de la sostenibilidad urbana para identificar, las contribuciones más significativas a la sostenibilidad urbana desde un enfoque geográfico, identificar los métodos más usados en la literatura, las principales categorías temáticas y el número de indicadores por dimensiones, así como el análisis de redes bibliométricas de palabras claves, hasta la fecha. Nuestros resultados, identificaron a China como el país con el mayor número de publicaciones. De igual manera, se identificaron las metodologías más utilizadas en la literatura, se concluye que carece de un marco unificador y que las ciudades se enfrentan al reto de estandarizar los análisis e identificar puntos en común entre ellas para desarrollar una metodología capaz de evaluar la sostenibilidad urbana adaptada al contexto particular de cada ciudad.

Por lo anterior y a partir de la revisión de las metodologías mencionadas en la literatura la mejor forma de integración es la utilización de dos o más metodologías que se adapten a los alcances del contexto que se pretende evaluar.

Por otro lado, nuestros resultados resaltan 57 artículos (49 % del total) que agrupan los indicadores en distintas dimensiones, resaltando la alta heterogeneidad en la selección de indicadores empleados para medir la sostenibilidad urbana. Esta investigación resalta la necesidad de generar un marco conceptual integrador que pueda ser empleado bajo distintos contextos y escenarios de sustentabilidad. De igual manera nuestro trabajo hace hincapié en la necesidad de evaluar diferentes ciudades para aumentar el conocimiento y promover estrategias que favorezcan el alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible es ciudades, principalmente en regiones con marcada pobreza como en ciudades en vías de desarrollo.

6. Referencias

- Acioly, Claudio., Vignol, Raphaelle., Jonsson, Asa., & UN-Habitat. (2020). *The New Urban Agenda illustrated*. ONU-Habitat.
- Alfonso Piña, W. H., & Pardo Martínez, C. I. (2016). Development and urban sustainability: An analysis of efficiency using data envelopment analysis. *Sustainability (Switzerland)*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/su8020148>
- Altamirano-Avila, A., & Martínez, M. (2021). Urban sustainability assessment of five Latin American cities by using SDEWES index. *Journal of Cleaner Production*, 287. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125495>
- Alvear, V. J. V., León, A. P. O., & Root, M. S. (2023). Urban sustainability in the Latin American intermediate city. The case of Loja - Ecuador. *Bitacora Urbano Territorial*, 33(3). <https://doi.org/10.15446/bitacora.v33n3.109577>
- Bhakti, T., Pena, J. C., Moura, A. C. M., Pujoni, D., Saliba, L., & Rodrigues, M. (2024). Urban biodiversity suitability index: decoding the relationships between cities and birds. *Urban Ecosystems*, 27(1), 305–319. <https://doi.org/10.1007/s11252-023-01446-5>
- Buzási, A., & Jäger, B. S. (2020). District-scale assessment of urban sustainability. *Sustainable Cities and Society*, 62. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102388>
- Cavoli, C. (2021). Accelerating sustainable mobility and land-use transitions in rapidly growing cities: Identifying common patterns and enabling factors. *Journal of Transport Geography*, 94. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2021.103093>

- Chamberlain, D., Reynolds, C., Amar, A., Henry, D., Caprio, E., & Batáry, P. (2020). Wealth, water and wildlife: Landscape aridity intensifies the urban luxury effect. *Global Ecology and Biogeography*, 29(9), 1595–1605. <https://doi.org/10.1111/geb.13122>
- Chao, A. L., Gallego, A. C., Lopez-Chao, V., & Alvarelllos, A. (2020). Indicators framework for sustainable urban design. *Atmosphere*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/atmos11111143>
- Cohen, M. (2017a). A systematic review of urban sustainability assessment literature. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 9, Issue 11). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su9112048>
- Cohen, M. (2017b). A systematic review of urban sustainability assessment literature. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 9, Issue 11). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su9112048>
- Contreras-Escandón, C. H. (2017). Superar la sostenibilidad urbana: Una ruta para América Latina1. *Bitacora Urbano Territorial*, 27(2), 27–34. <https://doi.org/10.15446/bitacora.v27n2.62483>
- Corredor-Ochoa, Á., Antuña-Rozado, C., Fariña-Tojo, J., & Rajaniemi, J. (2020). Challenges in assessing urban sustainability. In *Urban Ecology: Emerging Patterns and Social-Ecological Systems* (pp. 355–374). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820730-7.00019-7>
- Duran-Encalada, J. A., & Paucar-Caceres, A. (2009). System dynamics urban sustainability model for Puerto Aura in Puebla, Mexico. *Systemic Practice and Action Research*, 22(2), 77–99. <https://doi.org/10.1007/s11213-008-9114-8>

- Ellili, N. O. D. (2024). Bibliometric analysis of sustainability papers: Evidence from Environment, Development and sustainability. In *Environment, Development and Sustainability* (Vol. 26, Issue 4, pp. 8183–8209). Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03067-6>
- Fang, X., Shi, X., Phillips, T. K., Du, P., & Gao, W. (2023). The Spatiotemporal Variation Characteristics of Urban Sustainability Based on the SDGs in Yangtze River Delta, China. *Buildings*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/buildings13081909>
- Ferreira, J. F. de C., Corrêa, J. M., & de Alcantara Junior, J. E. (2021). Sustainability assessment in the Brazilian Amazon: the municipalities of the state of Amapá. In *Environment, Development and Sustainability* (Vol. 23, Issue 11, pp. 15725–15738). Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01359-3>
- Foroozesh, F., Monavari, S. M., Salmanmahiny, A., Robati, M., & Rahimi, R. (2022). Assessment of sustainable urban development based on a hybrid decision-making approach: Group fuzzy BWM, AHP, and TOPSIS–GIS. *Sustainable Cities and Society*, 76. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103402>
- García, R. M., & Seguel, L. I. (2019). Urban sustainability: Analysis to scale neighborhood in The Temuco City, Chile. *Arquiteturarevista*, 15(1), 103–116. <https://doi.org/10.4013/arq.2019.151.06>
- Gulnara, N., Laura, K., Damira, T., & Madiyar, K. (2022). Sustainable urban development assessment: Large cities in Kazakhstan. *Urbani Izziv*, 33(1), 70–81. <https://doi.org/10.5379/urbani-izziv-en-2022-33-01-01>

- Hassanzadehkermanshahi, K., & Shirowzhan, S. (2022). Measuring Urban Sustainability over Time at National and Regional Scale for Addressing United Nations Sustainable Development Goal (SDG) 11: Iran and Tehran as Case Studies. *Sustainability (Switzerland)*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/su14127402>
- Hawken, S., Rahmat, H., Sepasgozar, S. M. E., & Zhang, K. (2021). The sdgs, ecosystem services and cities: A network analysis of current research innovation for implementing urban sustainability. *Sustainability (Switzerland)*, 13(24). <https://doi.org/10.3390/su132414057>
- Hicks, C. C., Levine, A., Agrawal, A., Basurto, X., Breslow, S. J., Carothers, C., Charnley, S., Coulthard, S., Dolsak, N., Donatuto, J., Garcia-Quijano, C., Mascia, M. B., Norman, K., Poe, M. R., Satterfield, T., Martin, K. S., & Levin, P. S. (2016). Engage key social concepts for sustainability. *Science*, 352(6281), 38–40. <https://doi.org/10.1126/science.aad4977>
- Huang, L., Wu, J., & Yan, L. (2015a). Defining and measuring urban sustainability: a review of indicators. In *Landscape Ecology* (Vol. 30, Issue 7, pp. 1175–1193). Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/s10980-015-0208-2>
- Huang, L., Wu, J., & Yan, L. (2015b). Defining and measuring urban sustainability: a review of indicators. In *Landscape Ecology* (Vol. 30, Issue 7, pp. 1175–1193). Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/s10980-015-0208-2>
- Jorge-Ortiz, A., Braulio-Gonzalo, M., & Bovea, M. D. (2023). Assessing urban sustainability: a proposal for indicators, metrics and scoring—a case study in Colombia.

Environment, Development and Sustainability, 25(10), 11789–11822.
<https://doi.org/10.1007/s10668-022-02554-6>

Kaur, H., & Garg, P. (2019). Urban sustainability assessment tools: A review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 210, pp. 146–158). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.009>

Khodakarami, L., Pourmanafi, S., Mokhtari, Z., Soffianian, A. R., & Lotfi, A. (2023a). Urban sustainability assessment at the neighborhood scale: Integrating spatial modellings and multi-criteria decision making approaches. *Sustainable Cities and Society*, 97.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104725>

Khodakarami, L., Pourmanafi, S., Mokhtari, Z., Soffianian, A. R., & Lotfi, A. (2023b). Urban sustainability assessment at the neighborhood scale: Integrating spatial modellings and multi-criteria decision making approaches. *Sustainable Cities and Society*, 97.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104725>

Kong, L., Liu, Z., & Wu, J. (2020). A systematic review of big data-based urban sustainability research: State-of-the-science and future directions. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 273). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123142>

Li, F., Yigitcanlar, T., Nepal, M., Nguyen, K., & Dur, F. (2023). Machine learning and remote sensing integration for leveraging urban sustainability: A review and framework. In *Sustainable Cities and Society* (Vol. 96). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104653>

- Li, X., Lei, L., & Li, J. (2023). Integrating ecosystem service value into the evaluation of sustainable land use in fast-growing cities: A case study of Qingdao, China. *Ecological Indicators*, 153. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110434>
- Liang, X., Zhang, W., Chen, L., & Deng, F. (2016). Sustainable urban development capacity measure-A case study in Jiangsu Province, China. *Sustainability (Switzerland)*, 8(3). <https://doi.org/10.3390/su8030270>
- Liang, Y., Yi, P., Li, W., Liu, J., & Dong, Q. (2022). Evaluation of urban sustainability based on GO-SRA: Case study of Ha-Chang and Mid-southern Liaoning urban agglomerations in northeastern China. *Sustainable Cities and Society*, 87. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104234>
- Luo, X., & Huang, R. (2024). How to achieve sustainable development of smart city: a comprehensive bibliometric analysis. In *Clean Technologies and Environmental Policy*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s10098-024-02945-5>
- Malah, A., & Bahi, H. (2022a). Integrated multivariate data analysis for Urban Sustainability Assessment, a case study of Casablanca city. *Sustainable Cities and Society*, 86. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104100>
- Malah, A., & Bahi, H. (2022b). Integrated multivariate data analysis for Urban Sustainability Assessment, a case study of Casablanca city. *Sustainable Cities and Society*, 86. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104100>

- Marchetti, D., Oliveira, R., & Figueira, A. R. (2019). Are global north smart city models capable to assess Latin American cities? A model and indicators for a new context. *Cities*, 92, 197–207. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.04.001>
- Marvuglia, A., Havinga, L., Heidrich, O., Fonseca, J., Gaitani, N., & Reckien, D. (2020). Advances and challenges in assessing urban sustainability: an advanced bibliometric review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 124). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109788>
- Meijering, J. V., Tobi, H., & Kern, K. (2018). Defining and measuring urban sustainability in Europe: A Delphi study on identifying its most relevant components. *Ecological Indicators*, 90, 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.02.055>
- Merino-Saum, A., Halla, P., Superti, V., Boesch, A., & Binder, C. R. (2020). Indicators for urban sustainability: Key lessons from a systematic analysis of 67 measurement initiatives. In *Ecological Indicators* (Vol. 119). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106879>
- Michalina, D., Mederly, P., Diefenbacher, H., & Held, B. (2021). Sustainable urban development: A review of urban sustainability indicator frameworks. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 16). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/su13169348>
- Mithun, S., Sahana, M., Chattopadhyay, S., Chatterjee, S., Islam, J., & Costache, R. (2022). Comparative framework for spatially explicit urban growth modeling for monitoring urban land-use efficiency and sustainable urban development (SDG 11.3.1): a study on Kolkata metropolitan area, India. *Geocarto International*, 37(27), 17933–17970. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2136259>

- Morán, I. V., Martínez, S. A., Rejón, E. M. H., & Maya, J. R. C. (2023). Assessment of the multidimensional urban sustainability of the Puebla-Tlaxcala Metropolitan Area, Mexico. *Investigaciones Geograficas*, 112. <https://doi.org/10.14350/rig.60785>
- Mori, K., & Christodoulou, A. (2012). Review of sustainability indices and indicators: Towards a new City Sustainability Index (CSI). In *Environmental Impact Assessment Review* (Vol. 32, Issue 1, pp. 94–106). <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2011.06.001>
- Naciones Unidas. (2019). *World Urbanization Prospects 2018 Highlights*.
- Olawumi, T. O., & Chan, D. W. M. (2018). A scientometric review of global research on sustainability and sustainable development. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 183, pp. 231–250). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.162>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. In *The BMJ* (Vol. 372). BMJ Publishing Group. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Peralta Arias, J. J. (2020). Sostenibilidad urbana en el contexto latinoamericano y en el europeo = Urban sustainability in the Latinoamerican and in the European context. *Cuadernos de Investigación Urbanística*, 131, 1. <https://doi.org/10.20868/ciur.2020.131.4465>

- Rajaonson, J., & Tanguay, G. A. (2017). A sensitivity analysis to methodological variation in indicator-based urban sustainability assessment: a Quebec case study. *Ecological Indicators*, 83, 122–131. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.07.050>
- Rama, M., González-García, S., Andrade, E., Moreira, M. T., & Feijoo, G. (2020). Assessing the sustainability dimension at local scale: Case study of Spanish cities. *Ecological Indicators*, 117. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106687>
- Ramadan, M. S., & Effat, H. A. (2021a). Geospatial modeling for a sustainable urban development zoning map using AHP in Ismailia Governorate, Egypt. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(2), 191–202. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.01.003>
- Ramadan, M. S., & Effat, H. A. (2021b). Geospatial modeling for a sustainable urban development zoning map using AHP in Ismailia Governorate, Egypt. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(2), 191–202. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.01.003>
- Rebolledo-Leiva, R., Vásquez-Ibarra, L., Feijoo, G., Moreira, M. T., & González-García, S. (2023). Determining key indicators for the assessment of sustainable development in Spanish cities under a multi-criteria approach. *Cleaner Production Letters*, 5, 100046. <https://doi.org/10.1016/j.clpl.2023.100046>
- Robert, J., Gouëset, V., Demoraes, F., Centeno, P. V., Pereyra, O., Flechas, A. L., Lucas, M., Luna, C. M., Moreno, M. M., Pardo, C. F., Rueda, J. A. P., Prieto, G., Acosta, H. S., & Villar-Urbe, J. R. (2022). Urban Structure and Mobility Conditions in the Popular

- Peripheries of Lima and Bogotá: Challenges and Method of Analysis. *Territorios*, 46.
<https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/territorios/a.9942>
- Salles, A., Salati, M., & Bragança, L. (2023). Analyzing the Feasibility of Integrating Urban Sustainability Assessment Indicators with City Information Modelling (CIM). *Applied System Innovation*, 6(2). <https://doi.org/10.3390/asi6020045>
- Scherer, L., Behrens, P., de Koning, A., Heijungs, R., Sprecher, B., & Tukker, A. (2018). Trade-offs between social and environmental Sustainable Development Goals. *Environmental Science and Policy*, 90, 65–72.
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.10.002>
- Shackleton, C. M., Hebinck, P., Kaoma, H., Chishaleshale, M., Chinyimba, A., Shackleton, S. E., Gambiza, J., & Gumbo, D. (2014). Low-cost housing developments in South Africa miss the opportunities for household level urban greening. *Land Use Policy*, 36, 500–509. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.10.002>
- Sharifi, A. (2021). Urban sustainability assessment: An overview and bibliometric analysis. In *Ecological Indicators* (Vol. 121). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107102>
- Shmelev, S. E., & Shmeleva, I. A. (2018). Global urban sustainability assessment: A multidimensional approach. *Sustainable Development*, 26(6), 904–920.
<https://doi.org/10.1002/sd.1887>
- Soni, H., Yadav, R. K., & Patra, S. K. (2024). Global impact of urbanization on ecosystems: A comprehensive bibliometric analysis. *Natural Hazards Research*.
<https://doi.org/10.1016/j.nhres.2024.04.001>

- Stossel, Z., Kissinger, M., & Meir, A. (2015). *Measuring the biophysical dimension of urban sustainability*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.10.010>
- Tanguay, G. A., Rajaonson, J., Lefebvre, J. F., & Lanoie, P. (2010). Measuring the sustainability of cities: An analysis of the use of local indicators. *Ecological Indicators*, 10(2), 407–418. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.07.013>
- Thondhlana, G., Mubaya, C. P., McClure, A., Amaka-otchere, A. B. K., & Ruwanza, S. (2021). Facilitating urban sustainability through transdisciplinary (Td) research: Lessons from Ghana, South Africa and Zimbabwe. *Sustainability (Switzerland)*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/su13116205>
- Valdivia-Loro, A. (2019). *Vista de Evaluación del índice de sostenibilidad urbana. Aplicación para Lima Metropolitana*.
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Wang, D., Dong, L., & Di, S. (2023). Data-driven comparison of urban sustainability towards sustainable urban development under sustainable development goals (SDGs): a review based on bibliometric analysis. In *Frontiers in Energy Research* (Vol. 11). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1168126>
- Winchester, L., Latina, A., & Caribe, E. (2006). Tema central Desafíos para el desarrollo sostenible de las ciudades en. In *Revista eure: Vol. XXXII*.

- Wu, M., Yan, B., Huang, Y., & Sarker, M. N. I. (2022). Big Data-Driven Urban Management: Potential for Urban Sustainability. In *Land* (Vol. 11, Issue 5). MDPI. <https://doi.org/10.3390/land11050680>
- Xie, Y., Liu, C., Chang, S., & Jiang, B. (2022). Urban Sustainability: Integrating Socioeconomic and Environmental Data for Multi-Objective Assessment. *Sustainability (Switzerland)*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/su14159142>
- Yang, B., Xu, T., & Shi, L. (2017). Analysis on sustainable urban development levels and trends in China's cities. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 141, pp. 868–880). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.121>
- Zeng, X., Yu, Y., Yang, S., Lv, Y., & Sarker, M. N. I. (2022). Urban Resilience for Urban Sustainability: Concepts, Dimensions, and Perspectives. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 14, Issue 5). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su14052481>
- Zhang, C., Sun, Z., Xing, Q., Sun, J., Xia, T., & Yu, H. (2021). Localizing indicators of sdg11 for an integrated assessment of urban sustainability—a case study of hainan province. *Sustainability (Switzerland)*, 13(19). <https://doi.org/10.3390/su131911092>
- Zhou, S., Li, W., Lu, Z., & Cheng, R. (2020). An ecosystem-based analysis of urban sustainability by integrating ecosystem service bundles and socio-economic-environmental conditions in China. *Ecological Indicators*, 117. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106691>

Capítulo 2

Sostenibilidad urbana en San Luis Potosí: Integración de herramientas espaciales en el análisis de una ciudad árida.

Artículo siguiendo el formato de la revista Environment, Development and Sustainability

Sostenibilidad urbana: Integración de herramientas espaciales para comprender la sostenibilidad urbana en ciudades áridas

Saliha Barbosa-Martinez¹, Fredy Alvarado^{1,4*}, Juan José Von Thaden Ugalde², Carlos Renato Ramos Palacio³, Aura Ontiveros-Valencia⁴

1 Laboratorio de Paisajes Antrópicos Sostenibles (LPAS), División de Ciencias Ambientales, Instituto Potosino de Ciencia y Tecnología (IPICYT) Camino a la Presa San José 2055, Lomas 4ta. Sección. San Luis Potosí 78216, S.L.P. México

2 Laboratorio de Planeación Ambiental, Departamento El Hombre y su Ambiente, Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco

3 Facultad del Hábitat, Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP)

4 División de Ciencias Ambientales, Instituto Potosino de Ciencia y Tecnología (IPICYT)

*Correspondence author: Fredy Alvarado: fredy.alvarado@ipicyt.edu.mx

Resumen

Las ciudades áridas y semiáridas son mayormente vulnerables al cambio climático debido a la escasez de agua, rápida urbanización, pérdida de biodiversidad y las marcadas desigualdades socioeconómicas entre sus habitantes. Por lo tanto, los planificadores urbanos y tomadores de decisiones necesitan estrategias que mitiguen el impacto de la urbanización y aumenten el bienestar humano en las zonas urbanas, como parte de un enfoque integral de ciudades sostenibles. En este trabajo empleamos un enfoque multidisciplinario para generar un Índice de Sostenibilidad Urbana (ISU), con una herramienta espacialmente explícita que describa los niveles de sostenibilidad urbana basados en múltiples datos socioeconómicos y ambientales. San Luis Potosí (SLP), México, es una ciudad semi árida mexicana de cerca de un millón de habitantes ubicada en la zona semiárida al norte del país, nosotros empleamos

un análisis de estandarización de información geográfica para agrupar distintos indicadores espacialmente explícitos que describen los principales aspectos involucrados en la sostenibilidad urbana. Se utilizaron siete indicadores de sostenibilidad, agrupados en tres indicadores ambientales, tres socioeconómicos y uno de infraestructura urbana para la creación del ISU. Nuestros resultados revelaron que la ciudad de SLP se encuentra muy lejos de ser una ciudad sostenible (con valores máximos estimados del ISU cercanos a 4, donde 7 corresponde a una elevada sostenibilidad urbana). Sin embargo, observamos que los mayores valores de sostenibilidad observados a pesar de considerarse bajos se encuentran dispersos en la ciudad revelando una alta heterogeneidad urbana. Se encontró evidencia del llamado "efecto de lujo" en la sostenibilidad urbana, el cual se refiere a una mayor disponibilidad de infraestructura urbana y una mayor concentración de cobertura vegetal en áreas con menor marginación socioeconómica. El ISU demostró que puede ser aplicado en escenarios de ciudades áridas para informar a tomadores de decisiones, gestores del territorio y encargados de la planificación urbana como repensar ciudades áridas bajo un enfoque de sostenibilidad.

Palabras claves:

Análisis espacial, Ecología urbana, Efecto de lujo, SIG, Indicadores de sostenibilidad, modelos espacialmente explícitos, Percepción remota.

1. Introducción

Las ciudades representan apenas el 3% de la superficie terrestre, pero consumen aproximadamente el 80% de la energía mundial y producen cerca del 75% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (Naciones Unidas, 2024). En la actualidad, más de la mitad de la población mundial vive en las ciudades y se prevé que para el 2050 la cifra aumente al 70% (Naciones Unidas, 2024). Sin embargo, la gran mayoría de las ciudades no están preparadas para esta rápida urbanización, especialmente en los países en desarrollo, lo que se traduce en una expansión urbana descontrolada, contaminación y una infraestructura verde urbana limitada (es decir, jardines y parques públicos, árboles en las calles, tejados verdes, etc.; Zhang (2016)).

Por lo tanto, los planificadores urbanos y los tomadores de decisiones necesitan estrategias para mitigar los efectos de la urbanización en la biodiversidad y el consiguiente bienestar humano en las zonas urbanas como parte de un enfoque integral de ciudades sostenibles (Yigitcanlar et al. 2015; Bai 2016). Lo anterior se destaca en la Agenda Global 2030 para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible en donde la planificación sustentable de ciudades es una prioridad mundial (ODS 11, Naciones Unidas 2024).

Las zonas áridas, definidas como áreas donde la productividad primaria y el ciclo de nutrientes están limitados por la disponibilidad de agua, cubren más del 40% de la superficie terrestre mundial (Safriel et al. 2005). Dado que casi el 33% de la población mundial vive en regiones áridas y semiáridas, los entornos urbanos de estas zonas son un componente importante del desarrollo urbano. (El-Beltagy y Madkour 2012). Esto es particularmente importante en países en desarrollo como México, donde las regiones áridas y semiáridas cubren más de la mitad (52%) del país y albergan alrededor del 20% de la población nacional

(Pontifes et al. 2018). De acuerdo con Shmelev y Shmeleva, (2018), identificar componentes urbanos que promuevan la sostenibilidad es un componente clave en el manejo de ciudades, pero es particularmente importante en ciudades localizadas en contextos climáticos áridos y semi áridos (Alves et al., 2020).

Autores como Shmelev y Shmeleva, (2018), definen la sostenibilidad urbana como la compleja capacidad de una ciudad para funcionar eficazmente en las esferas económica, social y ambiental simultáneamente. Por otro lado, Corredor-Ochoa y colaboradores (2020), proponen la definición clásica de la sostenibilidad, la cual se refiere a la capacidad de una ciudad o área urbana para satisfacer las necesidades de su población actual sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades. No obstante, existen diferentes limitaciones metodológicas y conceptuales, entre las que destacan la amplia variación en el número de indicadores, así como, la inconsistencia entre marcos conceptuales, variabilidad en la aplicación y la falta de métodos establecidos comparables (Mori y Christodoulou, 2012; Tanguay et al., 2010; Shmelev y Shmeleva, 2018).

Un claro ejemplo de esto lo reportan Wang y colaboradores, (2023) quienes en su análisis global reportan el uso de mínimo tres indicadores hasta 46 indicadores usados para medir la sostenibilidad urbana. De igual manera, se han propuesto distintos abordajes que incluyen la ISO 37120 sobre Desarrollo Sostenible de Comunidades (ISO, 2014), y los Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS (ONU, 2015), en específico el ODS 11 “Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles”, diversos estudios evalúan la sostenibilidad urbana en base al ODS 11 (Hassanzadehkermanshahi y Shirowzhan, 2022; Mithun et al., 2022).

En este sentido se han propuesto, múltiples marcos conceptuales para evaluar la sostenibilidad urbana desde diversas perspectivas (Cohen, 2017), pero se ha resaltado la necesidad de un marco conceptual unificado y sólido para las evaluaciones que abarque la complejidad y la interdependencia de los aspectos económicos, sociales y ambientales. Adicionalmente, la elevada heterogeneidad ambiental, social y económica entre países hace prácticamente imposible replicar algunos de los marcos conceptuales más empleados en países templados lo que dificulta validar indicadores en donde la información primaria para la elaboración de indicadores es generalmente de acceso restringido o inexistente. (Cohen, 2017; Corredor-Ochoa et al., 2020; Dawodu et al., 2020).

El uso de imágenes de satélite de libre distribución y el acceso a metadatos disponibles a través de agencias de gobierno, han permitido una síntesis de información, favoreciendo la construcción de indicadores (Chao et al., 2020). Mas recientemente, algunos estudios han aplicado el mapeo de indicadores a escala de la ciudad, como Bhakti y colaboradores, (2024), en donde a partir del uso de múltiples capas geográficas identificaron la sostenibilidad urbana empleando indicadores espacialmente explícitos que abarcan tanto el componente social, económico y ambiental.

Por otro lado, espacializar la información urbana ha demostrado ser una herramienta útil en la toma de decisiones ya que favorecen la ubicación en tiempo real de necesidades apremiantes para el desarrollo sostenible de una ciudad, así como para la solución de problemas ambientales (Dickey et al., 2022). No obstante, como resaltan Rega-Brodsky y colaboradores (2022) la información disponible en relación con aspectos claves de ecología urbana es aún muy limitada y particularmente en regiones áridas y semiáridas esta información es prácticamente inexistente.

Un aspecto importante que resalta la heterogeneidad de las ciudades en relación con su sostenibilidad es el efecto de lujo. El cual se ha definido como la tendencia en la cual las zonas urbanas de mayor poder adquisitivo presentan los mayores niveles de riqueza y diversidad ecológica. Por el contrario, las áreas urbanas con un nivel socioeconómico más bajo tienden a albergar comunidades con menos especies, menor diversidad y menores funciones ecológicas (Kinzig et al., 2005). Sumado a lo anterior, Chamberlain y colaboradores, (2020), destacan que, en las zonas urbanas áridas, el efecto de lujo es más pronunciado, lo que indica que la disponibilidad del agua y gestión de recursos pueden influir positiva o negativamente en la sostenibilidad urbana.

En este estudio, nosotros proponemos, elaboramos y aplicamos un índice de sostenibilidad urbana (ISU) desarrollado para el escenario de la ciudad semi árida de San Luis Potosí, México. Empleando metadatos disponibles a través de agencias gubernamentales mexicanas como el Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI) y el Consejo Nacional de Población (CONAPO), así como tecnología basada en sistemas de información geográfica y percepción remota construimos nuestro ISU empleando siete indicadores de integridad ambiental, socioeconómica y de infraestructura urbana a escala de AGEB (Áreas Geoestadísticas Básicas propuestas por el INEGI, México). Las AGEB son una extensión territorial que corresponde a la subdivisión de un municipio y estos pueden ser urbanos o rurales (INEGI, 2024). Para analizar el potencial efecto de lujo empleamos los datos de infraestructura de áreas verdes públicas para la zona metropolitana de SLP realizado por Renato y colaboradores, (2023). Predecimos que la sostenibilidad en la ciudad árida de SLP evidencie una alta heterogeneidad espacial, en donde áreas con mayor sostenibilidad estén

asociados a áreas con mayor cobertura vegetal y un muy bajo índice de vulnerabilidad socioeconómica.

2. Metodología y datos

2.1. Área de estudio

La ciudad semiárida de San Luis Potosí (22°08'59"N 100°58'30"O) se encuentra ubicada en el centro norte de México y al suroeste del estado homónimo. Limita al sur con el Municipio de Villa de Reyes, al este con los Municipios del Cerro de San Pedro, Soledad de Graciano Sánchez, Zaragoza y Villa de Hidalgo (Fig. 7). La ciudad tiene una superficie de 1.482 km² con una población humana estimada de 911.908 (INEGI, 2020). La principal actividad económica de la ciudad es la industria automotriz. En 2023 las ventas de repuestos y accesorios para vehículos automotores representaron un total de US\$1,680 Millones/anuales. En el periodo enero a diciembre de 2023, la inversión extranjera directa en San Luis Potosí alcanzó los US\$1,116 Millones de dólares y, la tasa de participación laboral en San Luis Potosí fue del 61.3% para el 2023 (Data México, 2023).

El clima de SLP pertenece a climas secos y semisecos, De acuerdo con la clasificación de Köppen, el clima es semiárido frío (BSk), con una temperatura media anual de 18°C y una precipitación media anual de 360 mm, con dos estaciones claramente definidas, la seca de marzo a junio y la de lluvias de julio a septiembre de acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2017). La vegetación nativa se compone de plantas cortas, espinosas o matorrales como el arbusto creosote (*Larrea tridentata*), palma potosí (*Yucca potosina*), acacia dulce (*Vachellia farnesiana*), mezquite (*Prosopis spp.*), arbusto quebradizo (*Encelia farinose*), cactus columnar (*Lophocereus marginatus*) y Biznaga (*Coryphantha*

potosiana). La vegetación urbana se compone de árboles ornamentales y de sombra no autóctonos como *Eucalyptus spp.*, *Pinus spp.*, tulipán africano (*Spathodea campanulata*), casuarina (*Casuarina spp.*), pimienta americana (*Schinus mole*) y Jacaranda azul (*Jacaranda mimosifolia*) debido a la dinámica de urbanización de las ciudades más cálidas y secas.

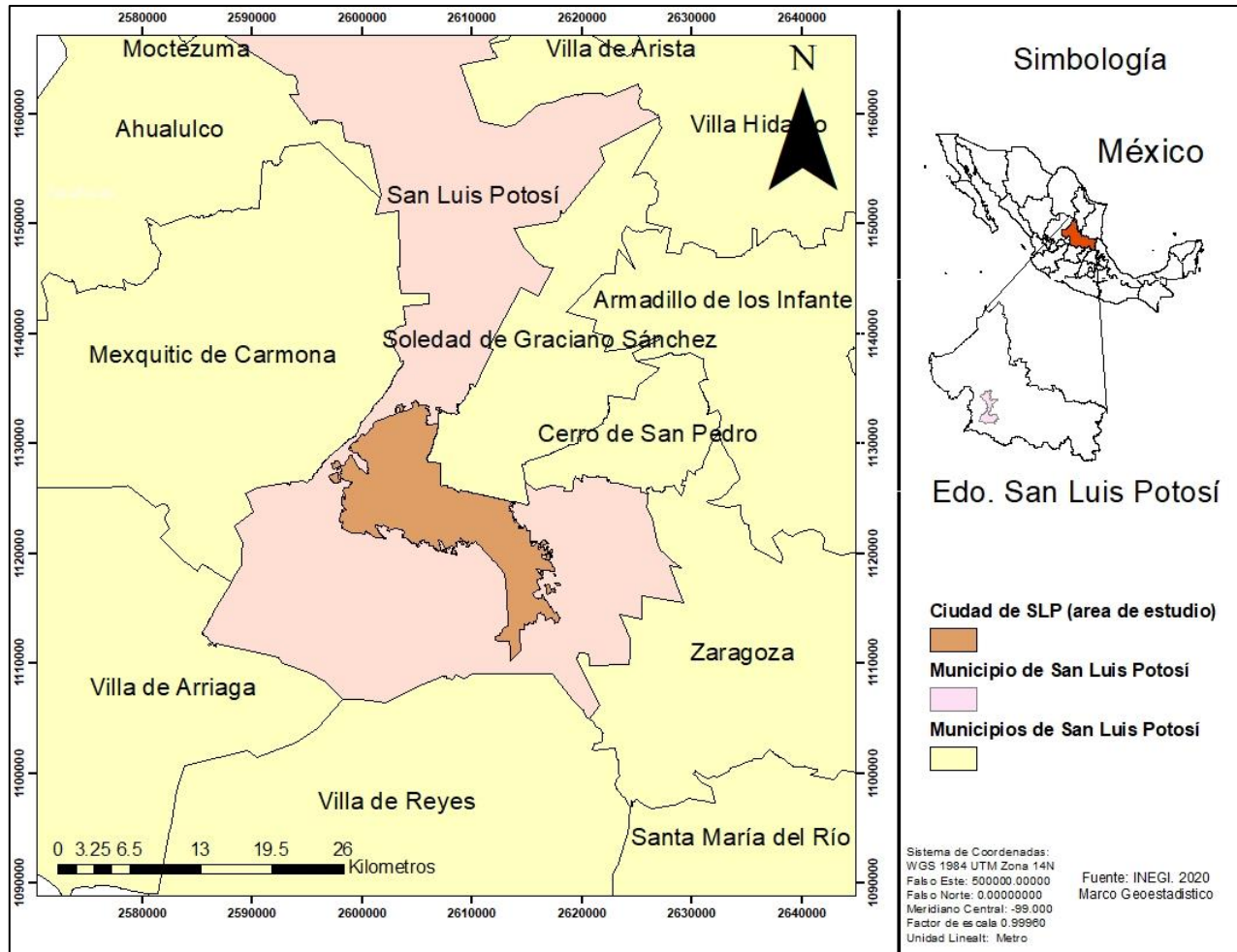


Figura 7. Mapa de ubicación de la ciudad de SLP

2.2. Datos geoespaciales empleados en el Índice de Sostenibilidad Urbana (ISU):

La información recabada para la construcción del índice proviene de metadatos del INEGI, CONAPO y de percepción remota mediante el uso de imágenes de satélite para la obtención de indicadores (Tabla 2). Para la construcción del Índice de Sostenibilidad Urbana (ISU), la evaluación y el análisis del nivel del desarrollo sostenible, se calculó un modelo basado en siete capas de datos geoespaciales (indicadores ambientales, socioeconómicos y de infraestructura urbana) de la ciudad de SLP, usando el software de ArcMap 10.8 (Esri Inc, 2020). Se utilizaron tres indicadores de carácter ambiental (temperatura superficial del suelo, densidad forestal y calidad del aire), tres indicadores socioeconómicos (densidad poblacional, grado promedio escolar y viviendas con acceso al agua potable y alcantarillado) y se creó un indicador de infraestructura urbana compuesto por cinco indicadores (carreteras secundarias, avenidas, calles, distribución de escuelas y distribución de hospitales; Tabla 2).

Empleamos estas capas geográficas de la ciudad de SLP para representar el paisaje urbano, en un contexto de ciudad semiárida siguiendo un enfoque de modelos espacialmente explícitos (DeAngelis y Yurek, 2017) y lo propuesto por Bhakti et al. (2023) como la manera de construir un índice que represente las condiciones ambientales en un paisaje urbano.

Las siete capas obtenidas de la ciudad de SLP (temperatura superficial del suelo, densidad forestal, calidad del aire, densidad poblacional, grado promedio escolar, viviendas con acceso al agua potable e infraestructura urbana) fueron estandarizadas y sumadas en valores de 1 cada capa, donde el máximo es 7, el cual representaría lugares con una alta sostenibilidad urbana. La metodología empleada se resume en la Figura 8.

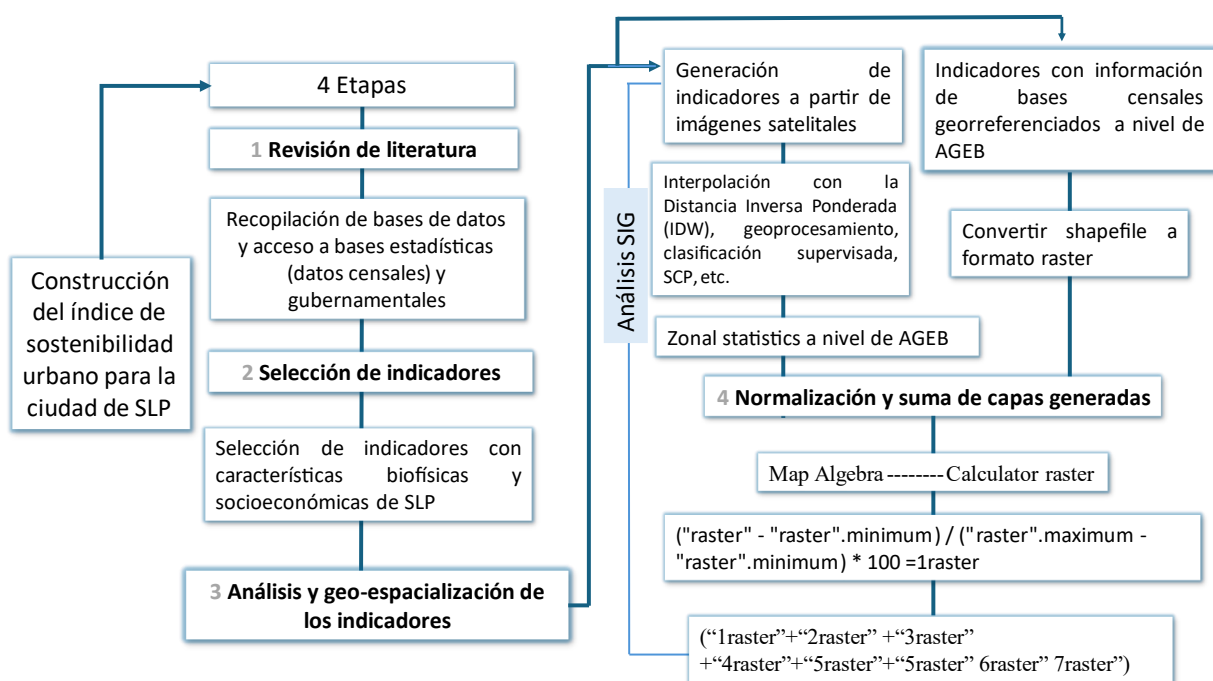


Figura 8. Esquema de la metodología utilizada en el presente capítulo

Tabla 2. Indicadores para la evaluación de la sostenibilidad urbana

Dimensión	Indicador	Unidad	Fuente
Ambiental	Temperatura Superficial del Suelo (LST)	C°	Landsat 8
Ambiental	Densidad forestal	Km ²	Imagen Planet
Ambiental	Calidad del aire	ppb	INEGI
Socioeconómico	Densidad poblacional	Km ² /hab	INEGI
Socioeconómico	Grado promedio escolar	Numérico	INEGI
Socioeconómico	Viviendas con acceso al agua potable	Numérico	INEGI
Infraestructura urbana	Carreteras	Shapefile	INEGI
Infraestructura urbana	Avenidas	Shapefile	INEGI

Infraestructura urbana	Calles	Shapefile	INEGI
Infraestructura urbana	Escuelas	Shapefile	INEGI
Infraestructura urbana	Hospitales	Shapefile	INEGI

A continuación, describimos detalladamente como fue el proceso de desarrollo de cada una de las capas usadas en la elaboración del índice de Sostenibilidad Urbana:

Capa 1. Análisis de la temperatura superficial (LST)

El primer paso fue obtener la imagen satelital Landsat 8-9 OLI/TIRS, con una resolución de 30 m, correspondiente al 6 de mayo de 2023 para la ciudad de SLP, y utilizar la banda termal 10 para estimar la temperatura de la superficie terrestre. Se utilizó el Semi-Automatic Classification Plugin (Congedo, Luca, 2021), el cual permite hacer el preprocesamiento de la imagen Landsat en el software de QGIS 3.28.3. Una vez generada la capa con la información de la temperatura, se dio formato de mapa de salida con ArcMap 10.8 (Fig. 9a).

El análisis de la temperatura superficial (LST), ha sido utilizado para evaluar la contribución de las áreas verdes a reducir las temperaturas y contribuir al efecto de enfriamiento en las ciudades (Khodakarami et al., 2023). El LST es empleado para evaluar la sostenibilidad urbana en las ciudades por que proporciona información crítica sobre el calor urbano y las diferencias térmicas dentro de una ciudad y así evaluar cómo afecta el aumento de la temperatura superficial en la calidad de vida de los habitantes (Malah y Bahi, 2022a).

Capa 2. Infraestructura verde urbana publica

A partir de un análisis meticuloso de georreferenciación y delimitación de toda la infraestructura de áreas verdes públicas para la zona metropolitana de SLP realizado por Renato y colaboradores, (2023), en formato KML, se obtuvieron las áreas verdes urbanas públicas para la ciudad de SLP, las cuales se pasaron a un formato shapefile, para su posterior análisis, descrito a continuación.

Se utilizo el software ArcMap 10.8, en la hoja de trabajo se subió el archivo shapefile del área de estudio y el shapefile de las áreas verdes públicas. Se creo un raster a partir del shapefile de las áreas verdes públicas con valor de 1 y un raster del área de estudio con valor de 10, para asegurar la suma de estas, después se empleó la herramienta mosaico a raster, en la herramienta se utilizó el raster de las áreas verdes y las AGEB del área de estudio.

Así generando una imagen, la cual cuenta con la información de la infraestructura de áreas verdes publicas dentro del área de estudio a nivel de AGEB, con valores entre 0 y 1. Posteriormente, para calcular la proporción de cada AGEB ocupada por espacios verdes, se utilizó la herramienta tabla estadísticas zonales y se dividió la columna suma por la columna contar (count).

Después realizamos la herramienta unión (join) utilizando la información de la columna recién creada con los datos de la proporción de áreas verdes por AGEB y el shapefile de los AGEB, posteriormente creamos un raster con la información generada, la cuál es la capa final utilizada en el índice. Por último, aplicamos el proceso de álgebra de mapas, con la herramienta calculadora raster, para normalizar la capa en valores entre 0 a 1 (fig. 9b)

Capa 3. Calidad del aire

Diversos estudios integran la calidad del aire a su evaluación de sostenibilidad urbana (Mithun et al., 2022; Gulnara et al., 2022b; Zhang et al., 2021). A partir de la información obtenida de los datos validos por la SEGAM, se generó una base de datos en Excel que contenía la información de la concentración en partes por billón (ppb) de los contaminantes ozono (O₃), monóxido de carbono (CO), óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), y partículas de menos de 10 micrómetros (PM10), de cada mes del año de 2023 por cada caseta (3 casetas).

Después se georreferenciaron las casetas para subirlas al software de ArcMap 10.8 y proseguir a una interpolación de los datos con la herramienta de interpolación IDW. Se genero una capa en formato raster por cada contaminante, se aplicó la herramienta zonal statistic, para dividir la información a nivel de AGEB. Luego, para producir cada capa, aplicamos un proceso de álgebra de mapas para estandarizar la información de cada capa en valores de 0 a 1 siendo 1 los valores de contaminación más altos. Se volvió a utilizar la herramienta calculator para la suma de capas finales y por último reclasificamos la superficie ráster a sus valores inversos. Los resultados se muestran en la Figura 9c.

Capa 4. Densidad poblacional

La densidad poblacional es un indicador crucial para medir la sostenibilidad urbana debido a su impacto en múltiples aspectos de la vida urbana. Una mayor densidad poblacional puede promover el uso eficiente del suelo, la infraestructura y los servicios públicos, sin embargo, también puede plantear desafíos en términos de

calidad del aire, congestión del tráfico (Castells-Quintana et al., 2021) y acceso equitativo a espacios verdes (Livert y Gainza, 2014).

La información base para los indicadores de tipo socioeconómico, fueron obtenidos de la base de datos de la encuesta del Censo De Población y Vivienda del 2020 de INEGI. Al tener delimitado el área de estudio a nivel de AGEB, fue posible georreferenciar la información de la encuesta con el software de ArcMap 10.8 y obtener la densidad poblacional, ya que cada AGEB contiene la información de población total. El último paso fue convertir la capa a formato raster y aplicamos el proceso de álgebra de mapas, con la herramienta calculator raster, para normalizar la capa en valores de 0 a 1, (ver Fig. 9d).

Capa 5. Viviendas que disponen de agua entubada y se abastecen del servicio público de agua.

Medir el acceso a agua potable refleja la calidad de vida de los habitantes de una ciudad, este indicador está relacionado con otros indicadores como la salud pública y la calidad ambiental. De acuerdo con Yang y colaboradores, (2020) establecen una correlación entre el índice de sostenibilidad urbana y el índice de calidad del agua. Se utilizó el Censo De Población y Vivienda del 2020 de INEGI. Al tener delimitado el área de estudio a nivel de AGEB, fue posible georreferenciar la información de la encuesta, con el software de ArcMap 10.8 y obtener el número de viviendas que disponen de agua entubada y se abastecen del servicio público de agua por AGEB, dentro del área de estudio. El último paso fue convertir la capa a formato raster y aplicamos el proceso de álgebra de mapas, con la herramienta calculator raster, para normalizar la capa en valores de 0 a 1 (Fig. 10e).

Capa 6. Grado promedio escolar

Autores como Malah y Bahi, (2022), utilizan el grado promedio escolar como indicador para representar la dimensión socioeconómica. Se utilizó el Censo De Población y Vivienda del 2020 de INEGI, para obtener la información, al tener delimitado el área de estudio a nivel de AGEB, fue posible georreferenciar la información del censo, con el software de ArcMap 10.8 y obtener el grado promedio escolar por AGEB, dentro del área de estudio. El último paso fue convertir la capa a formato raster y aplicamos el proceso de álgebra de mapas, con la herramienta calculator raster, para normalizar la capa en valores de 0 a 1 (Fig. 10f).

Capa 7. Infraestructura Urbana

Se utilizó el Marco Geoestadístico 2023, para las capas de avenidas, calles, carreteras, escuelas, hospitales, aplicamos las herramientas de *kernel density* y *line density* en el mapa vector, para obtener la densidad de calles, avenidas, y carreteras del área de estudio. La segunda capa se basó en un mapa de características de puntos que se construyó para medir la densidad de escuelas y hospitales. Después normalizamos las capas generadas entre 0 a 1, siendo 1 las regiones con mayor concentración de infraestructura urbana (Fig. 10g). Con la herramienta map algebra, sumamos el conjunto de capas generadas y obtuvimos una superficie ráster que describe regiones urbanas con diferentes niveles de acceso a infraestructura urbana.

Existen diversos estudios que utilizan la dimensión de infraestructura urbana (Gulnara et al., 2022a) (Heydari y Bakhtar, 2018; Wei et al., 2015).

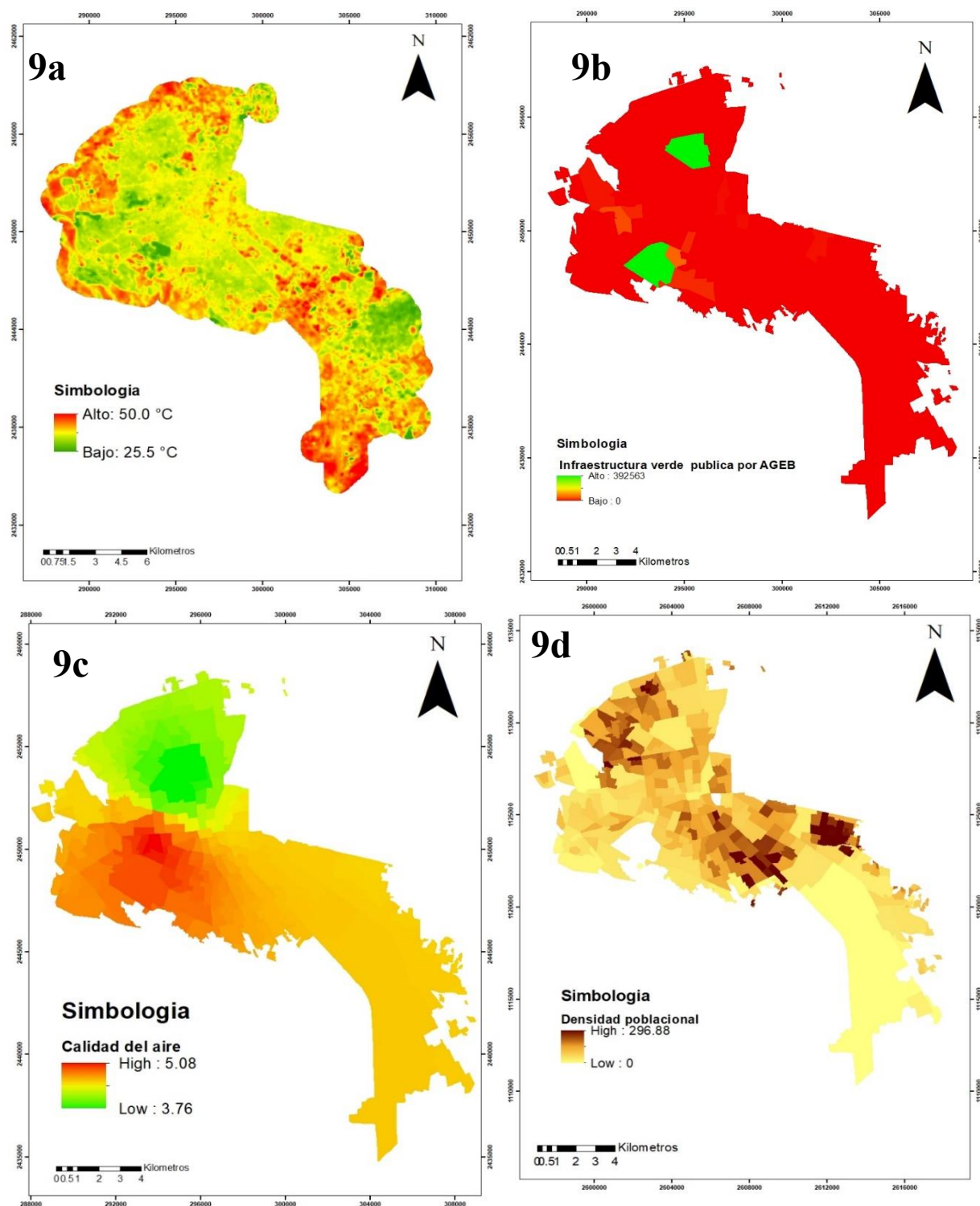


Figura 9. LST-a, Infraestructura verde publica-b, calidad del aire-c, densidad poblacional-d

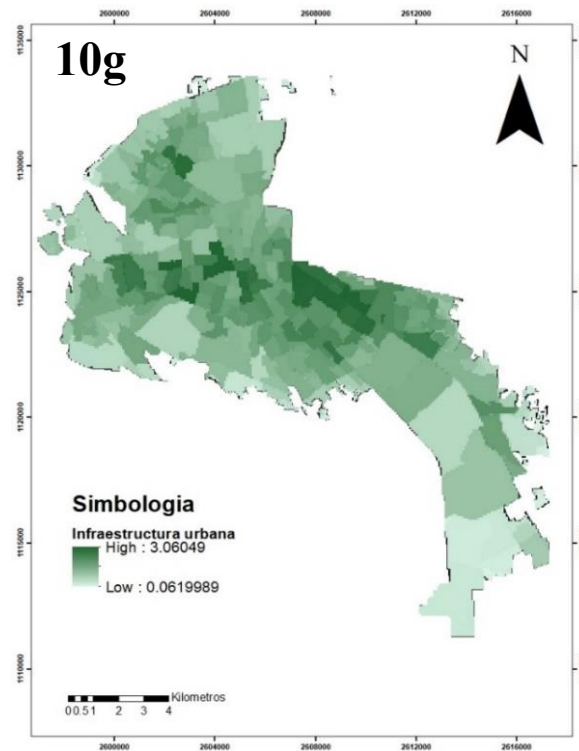
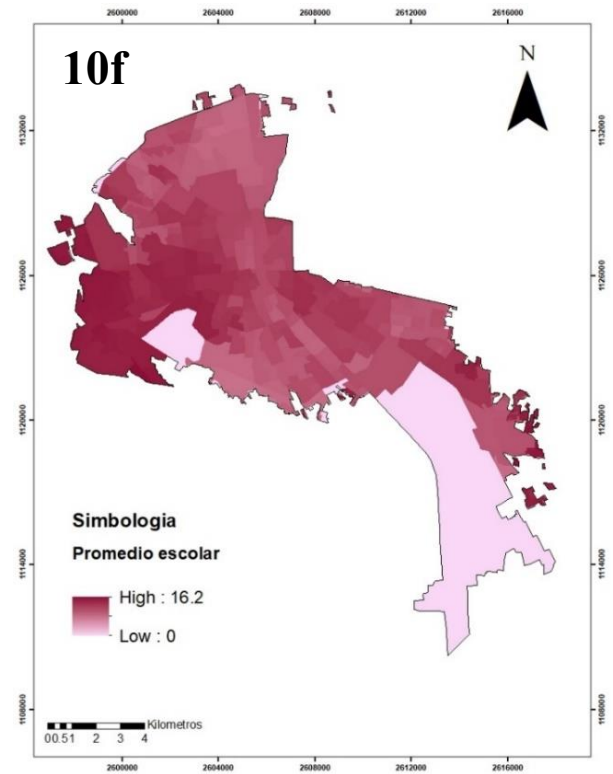
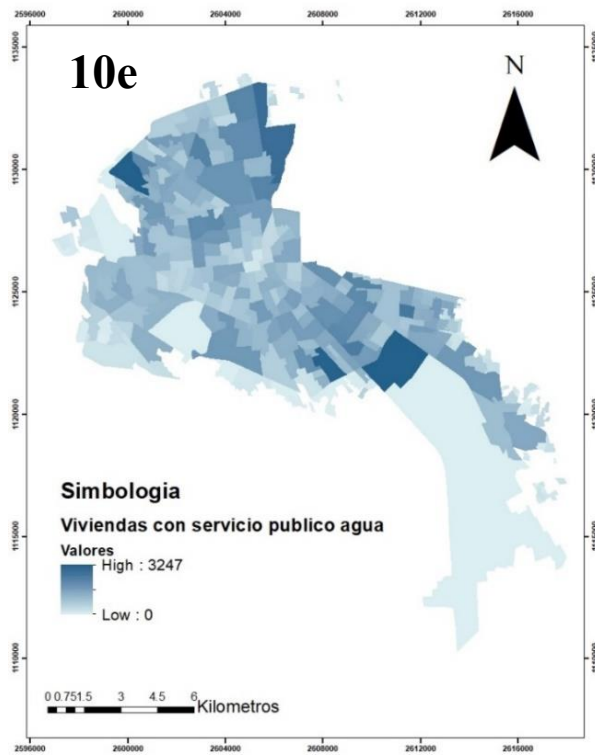


Figura 10. Viviendas que cuentan con agua potable-e, Grado promedio escolar-f e infraestructura urbana-g

2.3. Construcción del Índice de Sostenibilidad Urbana (ISU)

Una vez obtenida la información de todos los indicadores dentro del área de estudio, y que los mapas generados tengan la superficie raster, entre valores de 0 y 1, aplicamos un proceso de álgebra de mapas sumando las capas (Análisis de la Temperatura Superficial (LST), Áreas verdes urbanas., Calidad del aire, Densidad poblacional, Viviendas que disponen de agua entubada y se abastecen del servicio público de agua, Grado promedio escolar e Infraestructura Urbana) para producir el ISU, ver Fig. 11.

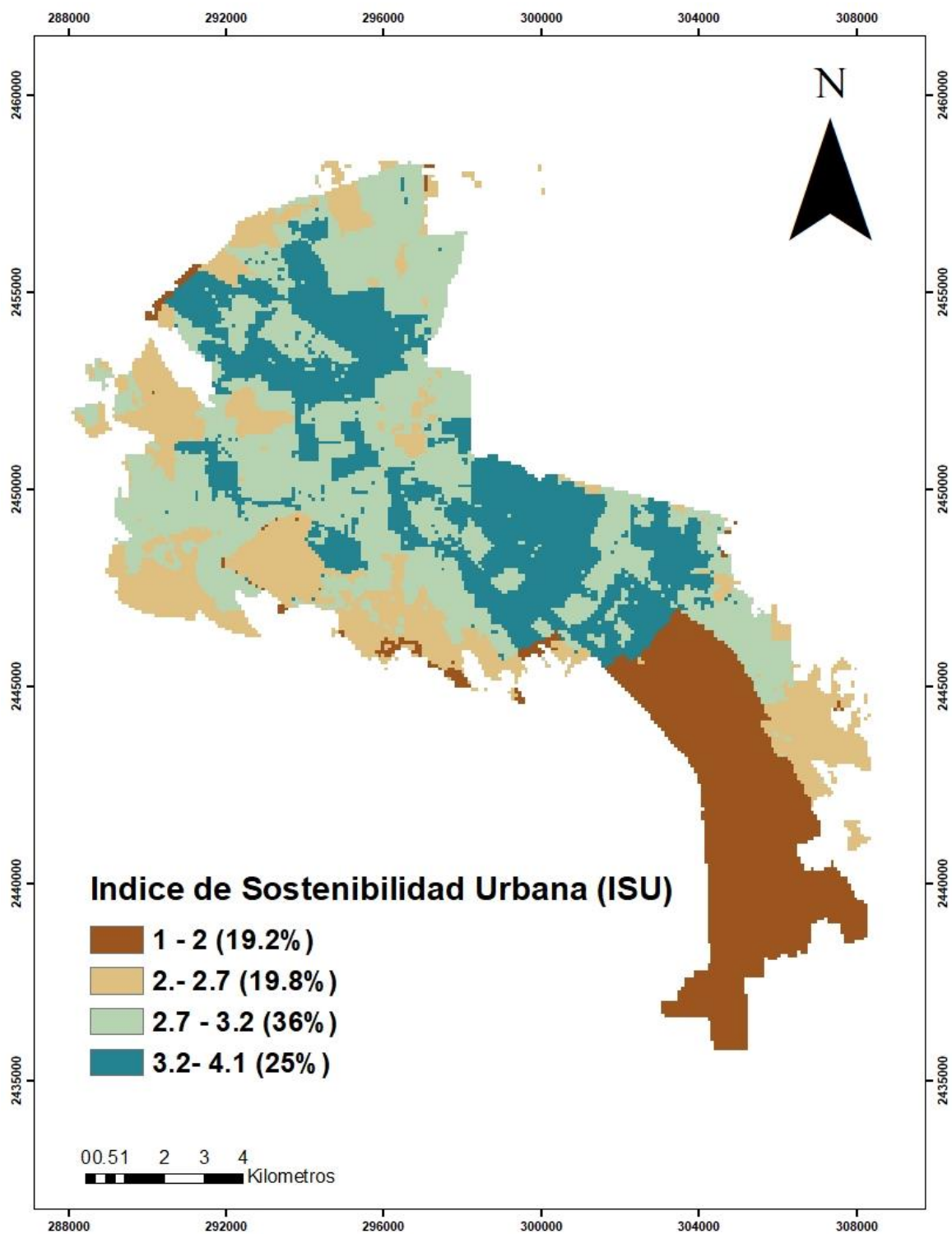


Figura 11. Modelación espacial de la sostenibilidad urbana

3. Resultados

El mapa final del ISU describe los niveles de sostenibilidad urbana a través del paisaje de SLP. Los valores de sostenibilidad en SLP varían de 1 (valor más bajo) a 4.1 (valor más alto). En particular, el nivel más alto de sostenibilidad identificado por el ISU (4.1) representa solo el 58,5% de la sostenibilidad máxima alcanzada por la ciudad de SLP. Sin embargo, de acuerdo con el índice, los valores cercanos a 7 deberían reflejar una alta sostenibilidad urbana (debido a la suma de las 7 capas). Nuestros resultados muestran que, el coeficiente medio de espacios verdes por habitante en la zona de estudio es de 8.59 m^2 ($7,840,117.037 \text{ m}^2 / 911,908$ habitantes).

Lo anterior podría sugerir que la ciudad cuenta con una cobertura vegetal considerable, sin embargo, si analizamos a fondo la presencia de áreas verdes y parques urbanos la mayoría de los AGEB no cuentan con una densidad forestal óptima (Fig. 9b), solo existen parches de vegetación escasos en la ciudad, que coinciden con las zonas de bajo grado de marginación.

Si analizamos los resultados por capas en comparación con el grado de marginación (ver material suplementario, Fig. 12), se observa que la zona con mayor grado de promedio escolar (noreste) es la zona con menor grado de marginación, ver Figura 10f. El sur oriente de la ciudad se encuentra con los valores más bajos de sostenibilidad (Fig. 11). Por otro lado, las zonas con los valores más bajos de índice se encuentran relacionados con los valores más altos de temperatura de la superficie terrestre (LST 50°C).

4. Discusión

A la luz de la ecología urbana, el índice ISU logro caracterizar los niveles de sostenibilidad en el paisaje urbano para la ciudad de SLP, mediante una perspectiva multidisciplinaria que integra teledetección y bases de datos censales para construir indicadores ambientales y socioeconómicos. Numerosos estudios han verificado la eficacia de la utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para realizar evaluaciones de sostenibilidad urbana (Bhakti et al., 2024; Buzási y Jäger, 2020; Gulnara et al., 2022; Malah y Bahi, 2022; Ramadan y Effat, 2021; Zhang et al., 2021). Los resultados más relevantes fueron: (i) Máximos valores de sostenibilidad para la ciudad de SLP se encuentran apenas por encima de la media (58% de la sostenibilidad total). (ii) Marcada heterogeneidad espacial en la distribución de la sostenibilidad urbana en el cual se identifica que la zona noroeste, sureste y central son más sostenibles que las zonas periferias. (iii) Por otro lado, las zonas con los valores más bajos de índice se encuentran relacionados con los valores más altos de temperatura de la superficie terrestre (LST 50°C). (iv) Observamos una significativa relación entre las zonas de baja y muy baja marginación y las zonas con los valores más altos del ISU, como esperábamos. (v) El ISU fue capaz de identificar los diferentes niveles de sostenibilidad urbana y resalta la alta heterogeneidad del paisaje urbana.

Valores bajos de sostenibilidad en la ciudad árida de SLP muestran que la ciudad está muy lejos de la sostenibilidad. Estos resultados coinciden con otras ciudades áridas como Yazd en Irán (Parivar et al. 2021) en donde obtuvieron 0.28 de 1.0. De acuerdo con Chamberlain y colaboradores (2020), las ciudades localizadas en ambientes áridos tienden a tener una marcada segregación en la distribución del arbolado y en la mitigación de la isla de calor urbano. Lo anterior principalmente asociado con la distribución del arbolado de las ciudades

áridas en donde los efectos de lujo son más acentuados que en ciudades con climas tropicales. En este trabajo en particular, se evidencio que existe un efecto en la distribución espacial en la ciudad de SLP, el cual mostró que la zona noroeste, sureste y central son más sostenibles que las zonas periféricas. Lo anterior puede explicarse por qué las zonas centro se beneficia de una mayor densidad de infraestructura verde urbana. Sumado a lo anterior los resultados de Khodakarami y colaboradores, (2023b), destacan que en las áreas centrales se encuentran niveles más altos de sostenibilidad en comparación con las zonas periféricas, debido a dos razones principales (i) Las zonas centrales tienden a tener mayor densidad de vegetación, en consecuencia, menor temperatura que en las áreas periféricas, (ii) Las zonas centrales tienden a tener más instalaciones públicas. Los dos argumentos se cumplen en este estudio. Por otro lado, dos análisis de sostenibilidad urbana para ciudades en América Latina (Robert et al., 2022; Winchester et al., 2006), destacan el desequilibrio centro-periferia que exacerba los problemas de las ciudades, y la marcada desigualdad entre los servicios urbanas del centro de la ciudad y de las zonas periféricas.

Teniendo en cuenta el efecto en la distribución espacial de la infraestructura verde urbana publica por AGEb para la ciudad de SLP (Fig. 9b), el coeficiente medio de espacios verdes por habitante en la zona de estudio es de 8.59 m^2 ($7,840,117.037 \text{ m}^2 / 911,908$ habitantes). En este sentido, las zonas con más área verde coinciden con los valores más altos del índice. Resultados similares fueron reportados por Monteiro y colaboradores, (2020), quienes encontraron que un elevado nivel de sostenibilidad urbana se asocia con un mayor porcentaje de áreas verdes de una ciudad, al mismo tiempo que coincide con las zonas de menor grado de marginación socioeconómica.

Asimismo, los hallazgos coinciden con los de Chamberlain y colaboradores (2020), quienes destacan una correlación positiva entre la biodiversidad urbana y el estatus socioeconómico, a menudo denominada "efecto de lujo", argumentan que, especialmente en las ciudades semiárida el efecto de lujo se intensifica, sugiere que las áreas con mayores ingresos tienden a tener un mejor acceso a los recursos hídricos, lo que se traduce en una mayor calidad de espacios verdes. Por el contrario, las áreas con mayores niveles de marginación carecen de los recursos y espacios adecuados para la implementación de nuevas áreas verdes urbanas. Como resultado, estas áreas pueden experimentar menor calidad de servicios ecosistémicas traduciéndose en efectos adversos como temperaturas más altas e incluso mayor predisposición a la presencia de insectos vectores de enfermedades (de la Mora-Covarrubias et al. 2008).

Nuestros resultados también revelaron que las zonas con los valores más bajos del ISU se encuentran relacionados con los valores más altos de temperatura de la superficie terrestre (LST 50°C). El estudio de Malah y Bahi, (2022) arrojó hallazgos comparables con nuestro estudio. Los autores sugieren que las áreas con temperaturas de superficie terrestre más altas tienden a tener valores de índice de sostenibilidad más bajos. Por el contrario, las áreas con puntuaciones de sostenibilidad inferiores a 23 °C se clasifican como buenas o muy buenas en términos de sostenibilidad.

Al analizar los resultados por capas y compararlos con el nivel de marginación (ver material complementario), se observa que la capa 6 (Fig. 10f), la región con el nivel educativo más alto (noreste) corresponde a la zona de menor grado de marginación. Este hallazgo se alinea con estudios previos como Malah y Bahi, (2022) que señalaron que un aumento en el porcentaje de graduados universitarios se asocia con una ligera disminución en la tasa de

desempleo, estableciendo una correlación entre altos valores de sostenibilidad y un alto porcentaje de graduados. En nuestro estudio, las áreas que muestran los niveles más altos de sostenibilidad también muestran altos niveles de educación.

Por otro lado, el índice no solo señala las áreas más sostenibles, sino que también es capaz de identificar áreas con un nivel de sostenibilidad medio, que pudieran tener algún tipo de manejo para mejorar el nivel de sostenibilidad, no obstante, las áreas urbanas dominadas por bajos niveles de sostenibilidad, deberían recibir especial atención por aparte de los tomadores de decisiones y de las partes interesadas.

Por otro lado, discutiendo desde un enfoque de una ciudad latinoamericana como lo es SLP, diversos autores plantean una visión crítica y propone una adaptación a los indicadores que existen en la literatura (Duran-Encalada y Paucar-Caceres, 2009; García y Seguel, 2019; Valdivia-Loro, 2019). De manera similar, Marchetti y colaboradores, (2019), argumentan que los marcos conceptuales para evaluar la sostenibilidad urbana se han desarrollado en países como, Estados Unidos, Canadá y en regiones geográficas como Europa, lo que plantea desafíos para los países latinoamericanos y que exista una metodología que refleje la realidad de sus ciudades. Sumado a lo anterior autores como (Contreras-Escandón, 2017; Peralta Arias, 2020), analizan a profundidad la sostenibilidad urbana en América latina y coinciden con dos ideas: i) falta de trabajos de evaluación de sostenibilidad urbana en ciudades latinas y ii) el desarrollo y la implementación práctica de estos marcos de medición no han alcanzado una etapa avanzada.

Por lo anterior la aplicación de metodologías dentro de un marco conceptual adaptado a un contexto de ciudades Latinoamericanas es de suma importancia.

Finalmente, conociendo el alto potencial del ISU como herramienta de gestión para la sostenibilidad urbana, es importante que los tomadores de decisiones y planificadoras urbanos apliquen los datos geoespaciales para evaluar las complejas relaciones de los ecosistemas urbanos.

5. Conclusión

Las áreas urbanas son ecosistemas complejos y diversos, influenciados por múltiples factores en donde los datos geoespaciales empleados para crear el ISU reflejan estas tendencias. El ISU presentado en este trabajo fue capaz de identificar diferentes niveles de sostenibilidad en la ciudad de SLP, logrando describir el paisaje urbano de una ciudad semi árida Mexicana. El índice aquí presentado, puede ser usado por planificadores urbanos con el objetivo de incluir la sostenibilidad en su agenda política. El ISU pretende ser una herramienta útil en la toma de decisiones permitiendo identificar áreas de oportunidad para mejorar las condiciones de sostenibilidad de los habitantes de SLP. Observamos una significativa relación entre las zonas de baja y muy baja marginación y las zonas con los valores más altos del ISU, lo que resalta el marcado efecto de lujo presente en la ciudad de SLP. Sumando a lo anterior existe una distribución desigual de las áreas verdes que repercute en la temperatura superficial del suelo en la ciudad de SLP.

La principal contribución de este trabajo radica en su metodología, que puede ser replicada en cualquier ciudad mexicana. Esto es posible gracias a la accesibilidad de las bases de datos del INEGI y a la disponibilidad de las imágenes Landsat. Al apegarse a la metodología

establecida y adaptarla al contexto específico del área de interés, se hace factible evaluar la sustentabilidad urbana de las ciudades mexicanas. Incluso podría incluirse ciudades latinoamericanas si estas ciudades cuentan con datos censales de institutos o entidades gubernamentales especializadas en datos estadísticos.

Sin embargo, el ISU presenta limitaciones entre las que destaca el acceso a la información como principal limitación y por otro lado el factor tiempo. La construcción del ISU tiene que elaborar bases de datos desde cero como en el caso del indicador de calidad del aire, donde a partir de los datos de contaminantes atmosféricos por día se tuvo que construir la base de datos referente a cada mes del año 2023. Debido a que el acceso a la información es limitada talvez no en todas las ciudades existan casetas de monitoreo ambiental o en su defecto no estén habilitados, asimismo por falta de información los países en desarrollo se enfrentan a mayores retos al momento de tratar de evaluar la sostenibilidad urbana.

6. Referencias

- Acioly, Claudio., Vignol, Raphaelle., Jonsson, Asa., & UN-Habitat. (2020). *The New Urban Agenda illustrated*. ONU-Habitat.
- Alfonso Piña, W. H., & Pardo Martínez, C. I. (2016). Development and urban sustainability: An analysis of efficiency using data envelopment analysis. *Sustainability (Switzerland)*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/su8020148>
- Altamirano-Avila, A., & Martínez, M. (2021). Urban sustainability assessment of five Latin American cities by using SDEWES index. *Journal of Cleaner Production*, 287. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125495>
- Alvear, V. J. V., León, A. P. O., & Root, M. S. (2023). Urban sustainability in the Latin American intermediate city. The case of Loja - Ecuador. *Bitacora Urbano Territorial*, 33(3). <https://doi.org/10.15446/bitacora.v33n3.109577>
- Bhakti, T., Pena, J. C., Moura, A. C. M., Pujoni, D., Saliba, L., & Rodrigues, M. (2024). Urban biodiversity suitability index: decoding the relationships between cities and birds. *Urban Ecosystems*, 27(1), 305–319. <https://doi.org/10.1007/s11252-023-01446-5>
- Buzási, A., & Jäger, B. S. (2020). District-scale assessment of urban sustainability. *Sustainable Cities and Society*, 62. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102388>
- Cavoli, C. (2021). Accelerating sustainable mobility and land-use transitions in rapidly growing cities: Identifying common patterns and enabling factors. *Journal of Transport Geography*, 94. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2021.103093>

- Chamberlain, D., Reynolds, C., Amar, A., Henry, D., Caprio, E., & Batáry, P. (2020). Wealth, water and wildlife: Landscape aridity intensifies the urban luxury effect. *Global Ecology and Biogeography*, 29(9), 1595–1605. <https://doi.org/10.1111/geb.13122>
- Chao, A. L., Gallego, A. C., Lopez-Chao, V., & Alvarelllos, A. (2020). Indicators framework for sustainable urban design. *Atmosphere*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/atmos11111143>
- Cohen, M. (2017a). A systematic review of urban sustainability assessment literature. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 9, Issue 11). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su9112048>
- Cohen, M. (2017b). A systematic review of urban sustainability assessment literature. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 9, Issue 11). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su9112048>
- Contreras-Escandón, C. H. (2017). Superar la sostenibilidad urbana: Una ruta para América Latina1. *Bitacora Urbano Territorial*, 27(2), 27–34. <https://doi.org/10.15446/bitacora.v27n2.62483>
- Corredor-Ochoa, Á., Antuña-Rozado, C., Fariña-Tojo, J., & Rajaniemi, J. (2020). Challenges in assessing urban sustainability. In *Urban Ecology: Emerging Patterns and Social-Ecological Systems* (pp. 355–374). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820730-7.00019-7>
- Duran-Encalada, J. A., & Paucar-Caceres, A. (2009). System dynamics urban sustainability model for Puerto Aura in Puebla, Mexico. *Systemic Practice and Action Research*, 22(2), 77–99. <https://doi.org/10.1007/s11213-008-9114-8>

- Ellili, N. O. D. (2024). Bibliometric analysis of sustainability papers: Evidence from Environment, Development and sustainability. In *Environment, Development and Sustainability* (Vol. 26, Issue 4, pp. 8183–8209). Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03067-6>
- Fang, X., Shi, X., Phillips, T. K., Du, P., & Gao, W. (2023). The Spatiotemporal Variation Characteristics of Urban Sustainability Based on the SDGs in Yangtze River Delta, China. *Buildings*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/buildings13081909>
- Ferreira, J. F. de C., Corrêa, J. M., & de Alcantara Junior, J. E. (2021). Sustainability assessment in the Brazilian Amazon: the municipalities of the state of Amapá. In *Environment, Development and Sustainability* (Vol. 23, Issue 11, pp. 15725–15738). Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01359-3>
- Foroozesh, F., Monavari, S. M., Salmanmahiny, A., Robati, M., & Rahimi, R. (2022). Assessment of sustainable urban development based on a hybrid decision-making approach: Group fuzzy BWM, AHP, and TOPSIS–GIS. *Sustainable Cities and Society*, 76. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103402>
- García, R. M., & Seguel, L. I. (2019). Urban sustainability: Analysis to scale neighborhood in The Temuco City, Chile. *Arquiteturarevista*, 15(1), 103–116. <https://doi.org/10.4013/arq.2019.151.06>
- Gulnara, N., Laura, K., Damira, T., & Madiyar, K. (2022). Sustainable urban development assessment: Large cities in Kazakhstan. *Urbani Izziv*, 33(1), 70–81. <https://doi.org/10.5379/urbani-izziv-en-2022-33-01-01>

- Hassanzadehkermanshahi, K., & Shirowzhan, S. (2022). Measuring Urban Sustainability over Time at National and Regional Scale for Addressing United Nations Sustainable Development Goal (SDG) 11: Iran and Tehran as Case Studies. *Sustainability (Switzerland)*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/su14127402>
- Hawken, S., Rahmat, H., Sepasgozar, S. M. E., & Zhang, K. (2021). The sdgs, ecosystem services and cities: A network analysis of current research innovation for implementing urban sustainability. *Sustainability (Switzerland)*, 13(24). <https://doi.org/10.3390/su132414057>
- Hicks, C. C., Levine, A., Agrawal, A., Basurto, X., Breslow, S. J., Carothers, C., Charnley, S., Coulthard, S., Dolsak, N., Donatuto, J., Garcia-Quijano, C., Mascia, M. B., Norman, K., Poe, M. R., Satterfield, T., Martin, K. S., & Levin, P. S. (2016). Engage key social concepts for sustainability. *Science*, 352(6281), 38–40. <https://doi.org/10.1126/science.aad4977>
- Huang, L., Wu, J., & Yan, L. (2015a). Defining and measuring urban sustainability: a review of indicators. In *Landscape Ecology* (Vol. 30, Issue 7, pp. 1175–1193). Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/s10980-015-0208-2>
- Huang, L., Wu, J., & Yan, L. (2015b). Defining and measuring urban sustainability: a review of indicators. In *Landscape Ecology* (Vol. 30, Issue 7, pp. 1175–1193). Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/s10980-015-0208-2>
- Jorge-Ortiz, A., Braulio-Gonzalo, M., & Bovea, M. D. (2023). Assessing urban sustainability: a proposal for indicators, metrics and scoring—a case study in Colombia.

Environment, Development and Sustainability, 25(10), 11789–11822.
<https://doi.org/10.1007/s10668-022-02554-6>

Kaur, H., & Garg, P. (2019). Urban sustainability assessment tools: A review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 210, pp. 146–158). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.009>

Khodakarami, L., Pourmanafi, S., Mokhtari, Z., Soffianian, A. R., & Lotfi, A. (2023a). Urban sustainability assessment at the neighborhood scale: Integrating spatial modellings and multi-criteria decision making approaches. *Sustainable Cities and Society*, 97.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104725>

Khodakarami, L., Pourmanafi, S., Mokhtari, Z., Soffianian, A. R., & Lotfi, A. (2023b). Urban sustainability assessment at the neighborhood scale: Integrating spatial modellings and multi-criteria decision making approaches. *Sustainable Cities and Society*, 97.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104725>

Kong, L., Liu, Z., & Wu, J. (2020). A systematic review of big data-based urban sustainability research: State-of-the-science and future directions. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 273). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123142>

Li, F., Yigitcanlar, T., Nepal, M., Nguyen, K., & Dur, F. (2023). Machine learning and remote sensing integration for leveraging urban sustainability: A review and framework. In *Sustainable Cities and Society* (Vol. 96). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104653>

- Li, X., Lei, L., & Li, J. (2023). Integrating ecosystem service value into the evaluation of sustainable land use in fast-growing cities: A case study of Qingdao, China. *Ecological Indicators*, 153. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110434>
- Liang, X., Zhang, W., Chen, L., & Deng, F. (2016). Sustainable urban development capacity measure-A case study in Jiangsu Province, China. *Sustainability (Switzerland)*, 8(3). <https://doi.org/10.3390/su8030270>
- Liang, Y., Yi, P., Li, W., Liu, J., & Dong, Q. (2022). Evaluation of urban sustainability based on GO-SRA: Case study of Ha-Chang and Mid-southern Liaoning urban agglomerations in northeastern China. *Sustainable Cities and Society*, 87. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104234>
- Luo, X., & Huang, R. (2024). How to achieve sustainable development of smart city: a comprehensive bibliometric analysis. In *Clean Technologies and Environmental Policy*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s10098-024-02945-5>
- Malah, A., & Bahi, H. (2022a). Integrated multivariate data analysis for Urban Sustainability Assessment, a case study of Casablanca city. *Sustainable Cities and Society*, 86. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104100>
- Malah, A., & Bahi, H. (2022b). Integrated multivariate data analysis for Urban Sustainability Assessment, a case study of Casablanca city. *Sustainable Cities and Society*, 86. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104100>

- Marchetti, D., Oliveira, R., & Figueira, A. R. (2019). Are global north smart city models capable to assess Latin American cities? A model and indicators for a new context. *Cities*, 92, 197–207. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.04.001>
- Marvuglia, A., Havinga, L., Heidrich, O., Fonseca, J., Gaitani, N., & Reckien, D. (2020). Advances and challenges in assessing urban sustainability: an advanced bibliometric review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 124). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109788>
- Meijering, J. V., Tobi, H., & Kern, K. (2018). Defining and measuring urban sustainability in Europe: A Delphi study on identifying its most relevant components. *Ecological Indicators*, 90, 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.02.055>
- Merino-Saum, A., Halla, P., Superti, V., Boesch, A., & Binder, C. R. (2020). Indicators for urban sustainability: Key lessons from a systematic analysis of 67 measurement initiatives. In *Ecological Indicators* (Vol. 119). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106879>
- Michalina, D., Mederly, P., Diefenbacher, H., & Held, B. (2021). Sustainable urban development: A review of urban sustainability indicator frameworks. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 16). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/su13169348>
- Mithun, S., Sahana, M., Chattopadhyay, S., Chatterjee, S., Islam, J., & Costache, R. (2022). Comparative framework for spatially explicit urban growth modeling for monitoring urban land-use efficiency and sustainable urban development (SDG 11.3.1): a study on Kolkata metropolitan area, India. *Geocarto International*, 37(27), 17933–17970. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2136259>

- Morán, I. V., Martínez, S. A., Rejón, E. M. H., & Maya, J. R. C. (2023). Assessment of the multidimensional urban sustainability of the Puebla-Tlaxcala Metropolitan Area, Mexico. *Investigaciones Geograficas*, 112. <https://doi.org/10.14350/rig.60785>
- Mori, K., & Christodoulou, A. (2012). Review of sustainability indices and indicators: Towards a new City Sustainability Index (CSI). In *Environmental Impact Assessment Review* (Vol. 32, Issue 1, pp. 94–106). <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2011.06.001>
- Naciones Unidas. (2019). *World Urbanization Prospects 2018 Highlights*.
- Olawumi, T. O., & Chan, D. W. M. (2018). A scientometric review of global research on sustainability and sustainable development. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 183, pp. 231–250). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.162>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. In *The BMJ* (Vol. 372). BMJ Publishing Group. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Peralta Arias, J. J. (2020). Sostenibilidad urbana en el contexto latinoamericano y en el europeo = Urban sustainability in the Latinoamerican and in the European context. *Cuadernos de Investigación Urbanística*, 131, 1. <https://doi.org/10.20868/ciur.2020.131.4465>

- Rajaonson, J., & Tanguay, G. A. (2017). A sensitivity analysis to methodological variation in indicator-based urban sustainability assessment: a Quebec case study. *Ecological Indicators*, 83, 122–131. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.07.050>
- Rama, M., González-García, S., Andrade, E., Moreira, M. T., & Feijoo, G. (2020). Assessing the sustainability dimension at local scale: Case study of Spanish cities. *Ecological Indicators*, 117. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106687>
- Ramadan, M. S., & Effat, H. A. (2021a). Geospatial modeling for a sustainable urban development zoning map using AHP in Ismailia Governorate, Egypt. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(2), 191–202. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.01.003>
- Ramadan, M. S., & Effat, H. A. (2021b). Geospatial modeling for a sustainable urban development zoning map using AHP in Ismailia Governorate, Egypt. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(2), 191–202. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.01.003>
- Rebolledo-Leiva, R., Vásquez-Ibarra, L., Feijoo, G., Moreira, M. T., & González-García, S. (2023). Determining key indicators for the assessment of sustainable development in Spanish cities under a multi-criteria approach. *Cleaner Production Letters*, 5, 100046. <https://doi.org/10.1016/j.clpl.2023.100046>
- Robert, J., Gouëset, V., Demoraes, F., Centeno, P. V., Pereyra, O., Flechas, A. L., Lucas, M., Luna, C. M., Moreno, M. M., Pardo, C. F., Rueda, J. A. P., Prieto, G., Acosta, H. S., & Villar-Urbe, J. R. (2022). Urban Structure and Mobility Conditions in the Popular

- Peripheries of Lima and Bogotá: Challenges and Method of Analysis. *Territorios*, 46.
<https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/territorios/a.9942>
- Salles, A., Salati, M., & Bragança, L. (2023). Analyzing the Feasibility of Integrating Urban Sustainability Assessment Indicators with City Information Modelling (CIM). *Applied System Innovation*, 6(2). <https://doi.org/10.3390/asi6020045>
- Scherer, L., Behrens, P., de Koning, A., Heijungs, R., Sprecher, B., & Tukker, A. (2018). Trade-offs between social and environmental Sustainable Development Goals. *Environmental Science and Policy*, 90, 65–72.
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.10.002>
- Shackleton, C. M., Hebinck, P., Kaoma, H., Chishaleshale, M., Chinyimba, A., Shackleton, S. E., Gambiza, J., & Gumbo, D. (2014). Low-cost housing developments in South Africa miss the opportunities for household level urban greening. *Land Use Policy*, 36, 500–509. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.10.002>
- Sharifi, A. (2021). Urban sustainability assessment: An overview and bibliometric analysis. In *Ecological Indicators* (Vol. 121). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107102>
- Shmelev, S. E., & Shmeleva, I. A. (2018). Global urban sustainability assessment: A multidimensional approach. *Sustainable Development*, 26(6), 904–920.
<https://doi.org/10.1002/sd.1887>
- Soni, H., Yadav, R. K., & Patra, S. K. (2024). Global impact of urbanization on ecosystems: A comprehensive bibliometric analysis. *Natural Hazards Research*.
<https://doi.org/10.1016/j.nhres.2024.04.001>

- Stossel, Z., Kissinger, M., & Meir, A. (2015). *Measuring the biophysical dimension of urban sustainability*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.10.010>
- Tanguay, G. A., Rajaonson, J., Lefebvre, J. F., & Lanoie, P. (2010). Measuring the sustainability of cities: An analysis of the use of local indicators. *Ecological Indicators*, 10(2), 407–418. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.07.013>
- Thondhlana, G., Mubaya, C. P., McClure, A., Amaka-otchere, A. B. K., & Ruwanza, S. (2021). Facilitating urban sustainability through transdisciplinary (Td) research: Lessons from Ghana, South Africa and Zimbabwe. *Sustainability (Switzerland)*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/su13116205>
- Valdivia-Loro, A. (2019). *Vista de Evaluación del índice de sostenibilidad urbana. Aplicación para Lima Metropolitana*.
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Wang, D., Dong, L., & Di, S. (2023). Data-driven comparison of urban sustainability towards sustainable urban development under sustainable development goals (SDGs): a review based on bibliometric analysis. In *Frontiers in Energy Research* (Vol. 11). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1168126>
- Winchester, L., Latina, A., & Caribe, E. (2006). Tema central Desafíos para el desarrollo sostenible de las ciudades en. In *Revista eure: Vol. XXXII*.

- Wu, M., Yan, B., Huang, Y., & Sarker, M. N. I. (2022). Big Data-Driven Urban Management: Potential for Urban Sustainability. In *Land* (Vol. 11, Issue 5). MDPI. <https://doi.org/10.3390/land11050680>
- Xie, Y., Liu, C., Chang, S., & Jiang, B. (2022). Urban Sustainability: Integrating Socioeconomic and Environmental Data for Multi-Objective Assessment. *Sustainability (Switzerland)*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/su14159142>
- Yang, B., Xu, T., & Shi, L. (2017). Analysis on sustainable urban development levels and trends in China's cities. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 141, pp. 868–880). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.121>
- Zeng, X., Yu, Y., Yang, S., Lv, Y., & Sarker, M. N. I. (2022). Urban Resilience for Urban Sustainability: Concepts, Dimensions, and Perspectives. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 14, Issue 5). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su14052481>
- Zhang, C., Sun, Z., Xing, Q., Sun, J., Xia, T., & Yu, H. (2021). Localizing indicators of sdg11 for an integrated assessment of urban sustainability—a case study of hainan province. *Sustainability (Switzerland)*, 13(19). <https://doi.org/10.3390/su131911092>
- Zhou, S., Li, W., Lu, Z., & Cheng, R. (2020). An ecosystem-based analysis of urban sustainability by integrating ecosystem service bundles and socio-economic-environmental conditions in China. *Ecological Indicators*, 117. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106691>
- Naciones Unidas. (2024). Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>

Urbanet. (2019). Infographics: Urbanisation and Urban Development in Mexico. <https://www.urbanet.info/urbanisation-and-urban-development-in-mexico/>

(Data México, 2023). <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/san-luis-potosi#economy>

Garcia, R A., Cameselle, J M S., y Arce, C. (1996, January 1). Evaluación de la calidad ambiental urbana. Taylor y Francis, 11(2), 235-252. <https://doi.org/10.1174/02134749660569378>

Smart y City Solutions. (2021, February 15). <https://www.smartandcity.com/>

Castells-Quintana, D., Dienesch, E., y Krause, M. (2021, November 1). Air pollution in an urban world: A global view on density, cities and emissions. Ecological economics, 189, 107153-107153. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107153>

Flores, E S., y Sosa, M R. (2017, October 31). Spatial suitability for urban sustainable densification in a borderland city. <https://doi.org/10.5897/jgrp2017.0648>

Livert, F., y Gainza, X. (2014, September 2). Understanding Density in an Uneven City, Santiago de Chile: Implications for Social and Environmental Sustainability. Sustainability, 6(9), 5876-5897. <https://doi.org/10.3390/su6095876>

Yang, J., Chen, T., Sun, Q., Huang, B., y Ren, S. (2020, May 1). The impact of urban development upon the quality of drinking water sources: Evidence from China. IOP conference series. Earth and environmental science, 508(1), 012072-012072. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/508/1/012072>

Parivar, P., Quanrud, D., Sotoudeh, A., y Abolhasani, M. (2021). Evaluation of urban ecological sustainability in arid lands (case study: Yazd-Iran). *Environment, Development and Sustainability*, 23, 2797-2826.

DeAngelis, D. L., y Yurek, S. (2017). Spatially explicit modeling in ecology: a review. *Ecosystems*, 20(2), 284-300.

Dickey, A., Kosovac, A., Fastenrath, S., Acuto, M., y Gleeson, B. (2022, December 1). Fragmentation and urban knowledge: An analysis of urban knowledge exchange institutions. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103917>

Kinzig, A P., Warren, P S., Martin, C., Hope, D., y Katti, M. (2005, January 1). The Effects of Human Socioeconomic Status and Cultural Characteristics on Urban Patterns of Biodiversity. <https://doi.org/10.5751/es-01264-100123>

HEYDARI, A., y BAKHTAR, S. (2018). ANALYZING THE REGIONAL DEVELOPMENT OF KURDISH BORDER CITIES OF IRAN USING SUSTAINABLE URBAN DEVELOPMENT INDICES (STUDY AREA: KURDISTAN PROVINCE). <https://doi.org/10.30892/gtg.2>

Conclusiones Generales

A partir del trabajo realizado se concluyen varios puntos importantes, lograr la sostenibilidad en países en vías de desarrollo puede llegar a ser utópico, cuando incluso evaluar la sostenibilidad urbana presenta un reto para los científicos debido a la falta de acceso a la información e indicadores disponibles. Debemos replantarnos la idea si realmente es el camino correcto para países fuera del contexto europeo. Si bien China es el país con el mayor numero de publicaciones surge la pregunta ¿debido a las características que presentan las ciudades chinas como la sobrepoblación, problemas de contaminación, expansión urbana pueden llegar a ser realmente ciudades sostenibles? y si el gran número de publicaciones es un reflejo de la creciente preocupación que existe en estas ciudades.

Asimismo, en la revisión bibliográfica encontremos que la gran mayoría de artículos (57) no utilizan las dimensiones clásicas de sostenibilidad, aumentan en muchos casos el numero de dimensiones, lo anterior puede deberse a que les resulta ambiguo y restrictivo al momento de evaluar la sostenibilidad urbana y por otro lado surge la pregunta si verdaderamente podrían llegar a ser considerado como estudios de sostenibilidad urbana al no contar con las dimensiones de sostenibilidad.

Por otro lado, cuando se analizan los marcos metodológicos se llegó a la conclusión que se carece de un marco unificador, por ende, la mejor forma de integración es empleando dos o mas metodologías que se adapten al contexto del análisis.

Sumado a la anterior se desarrolló un Índice de Sostenibilidad Urbana, para la ciudad de SLP, se identificaron limitaciones para la construcción del índice, la principal es la falta de acceso

a la información, debido a que muchos datos no se encuentran disponibles o simplemente no existen, haciendo más complicada la evaluación.

Para el presente trabajo se desarrolló una metodología con el objetivo que pueda ser replicada en otras ciudades, dentro del contexto mexicano, si bien la mayoría de los datos son de acceso abierto, el indicador de calidad de aire puede ser complicado de replicar por cuestiones de información disponible a nivel municipal por parte de otras ciudades.

Los principales resultados obtenidos a través del índice muestran una marcada desigualdad que se ve reflejada en la calidad de vida de los habitantes. Los valores máximos de sostenibilidad para la ciudad de SLP se encuentran apenas por encima de la media (58% de la sostenibilidad total).

Asimismo, existe un marcado efecto de lujo en la ciudad de SLP las áreas con mayores ingresos tienden a tener un mejor acceso a los recursos hídricos, lo que se traduce en una mayor calidad de espacios verdes. Como resultado las zonas con los valores más bajos del ISU se encuentran relacionados con los valores más altos de temperatura de la superficie terrestre (LST 50°C), así como las zonas con menor cobertura vegetal.

Material suplementario

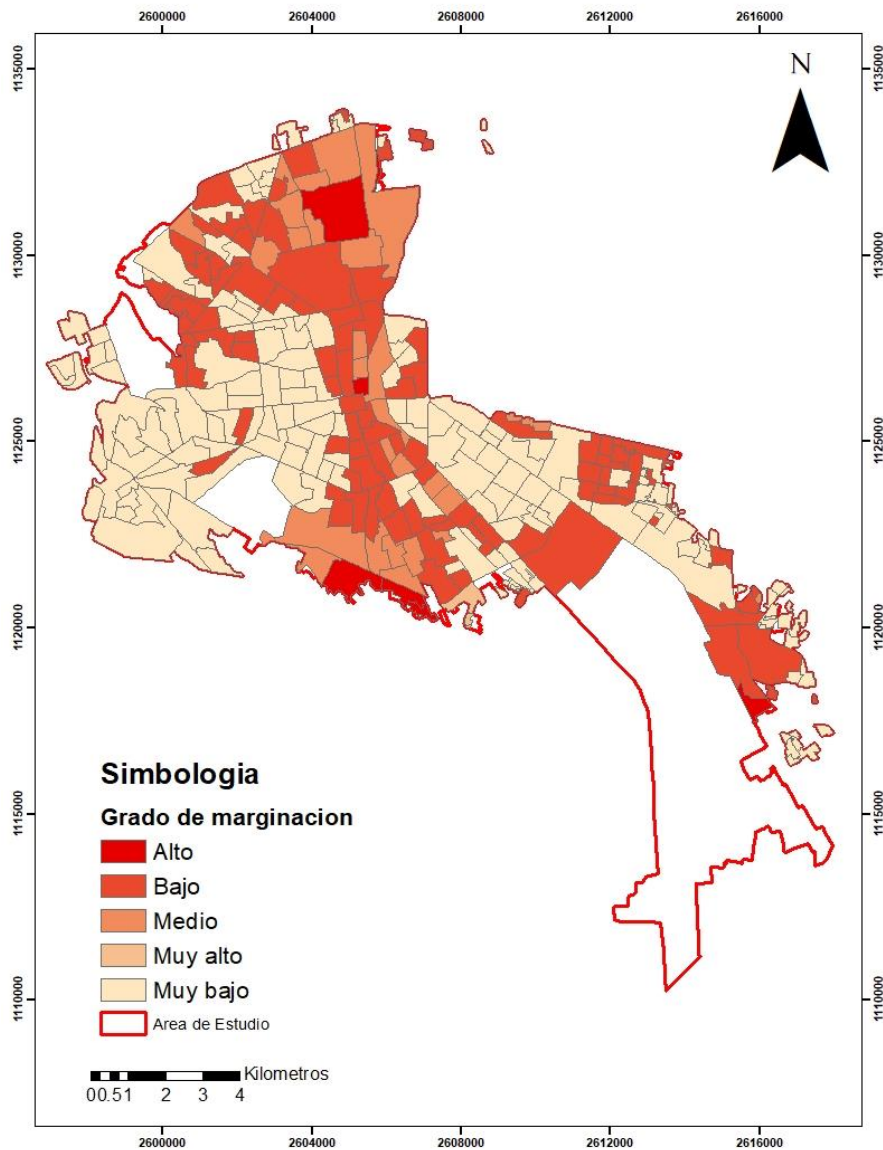


Figura 12. Mapa del grado de marginación en la ciudad de SLP