
ENFOQUES METODOLÓGICOS PARA EVALUAR EL POTENCIAL DE LA ADAPTACIÓN DE LAS MORFOLOGÍAS URBANAS AL CALENTAMIENTO GLOBAL

Por Dra. Cs. **Dania González Couret***, Dr. C. **Guillermo Antonio de la Paz Pérez****,
Dra. C. **Natalí Collado Baldoquín***** y Dr. C. **Luis Alberto Rueda Guzmán******

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana, Cuba.

*<https://orcid.org/0000-0002-1406-4588>

E-mail: daniagcouret@gmail.com

**<https://orcid.org/0000-0001-6626-6301>

E-mail: delapaz.pguille@gmail.com

***<https://orcid.org/0000-0003-4248-9708>

E-mail: colladobaldoquin@gmail.com

****<https://orcid.org/0000-0001-6549-3975>

E-mail: ruedaguz72@gmail.com

Resumen

Las ciudades y los edificios juegan un rol determinante en la adaptación al cambio climático y particularmente al calentamiento global. En el artículo se ofrecen los resultados parciales de la primera etapa de una investigación encaminada a evaluar los tipos morfológicos urbanos con vistas a proponer acciones y estrategias de transformación que favorezcan su adaptación al cambio climático. Se trata de una investigación teórica en la cual se procesan los resultados de la revisión bibliográfica con el objetivo de identificar los principales métodos e indicadores empleados a escala global, en aras de precisar los enfoques a aplicar en las siguientes etapas del estudio. Se concluye que estos tendrán que adaptarse a la información y tecnologías disponibles en Cuba y a las particularidades locales, evaluándose, a partir del monitoreo y la simulación, el comportamiento anterior y posterior en diversos escenarios mediante el análisis costo-beneficio.

Palabras clave: metodologías de evaluación, adaptación al cambio climático, morfologías urbanas, calentamiento global.

METHODOLOGICAL APPROACHES FOR ASSESSING THE POTENTIAL OF URBAN MORPHOLOGIES TO ADAPT TO GLOBAL WARMING

Abstract

Cities and buildings play a decisive role in adapting to climate change and particularly to global warming. This article offers the partial results of the first stage of a research aimed at evaluating urban morphological types with a view to proposing actions and transformation strategies that favour their adaptation to climate change. This is a theoretical investigation in which the results of the literature review are processed with the aim of identifying the main methods and indicators used on a global scale, in order to specify the approaches to be applied in the following stages of the study. It is concluded that these will have to be adapted to the information and technologies available in Cuba and to local particularities, evaluating, through monitoring and simulation, the upstream and downstream behaviour in different scenarios by means of cost-benefit analysis.

Keywords: solar energy, batteries, ion-litio, redox flow.

I. Introducción

El cambio climático es una realidad incuestionable, consecuencia de las emisiones de gases de efecto invernadero generadas fundamentalmente durante la segunda mitad del siglo XX. Es por ello que no solo es necesario acercarse a soluciones de carbono cero para mitigar el impacto a largo plazo, sino transformar los espacios habitables con vistas a una mejor adaptación a los cambios que ya están ocurriendo. En el logro de este objetivo, las ciudades y los edificios juegan un rol determinante, tanto por el impacto que generan, como por sus potencialidades para reducirlo y favorecer una mejor adaptación a las nuevas circunstancias.

Hacia ello se encamina el Plan de Estado para el enfrentamiento al cambio climático en Cuba, pero resulta insuficiente la atención que se brinda a los efectos del calentamiento global, fundamentalmente en las áreas urbanas, donde habita casi el 80 % de la población cubana. El aumento de la temperatura es un hecho que afecta a todo el planeta, pero se agrava en las regiones cálidas, que por lo general, son las más empobrecidas. Por tanto, la transformación de las ciudades en pos de su adaptación al cambio climático y atenuar sus efectos negativos sobre la salud y el bienestar de sus habitantes, es una urgencia en Cuba.

Es por ello necesario caracterizar, clasificar y evaluar los tipos urbanos morfológicos que nos permitan trazar las estrategias de transformación más apropiadas en cada caso, a ello se dedica el proyecto de investigación «Adaptación del hábitat urbano al cambio climático en Cuba», que acaba de concluir su primera etapa y está vinculado al programa nacional de ciencia y técnica sobre la adaptación al cambio climático.

En el artículo se expone una parte de los resultados obtenidos en la elaboración del marco teórico, específicamente aquellos relacionados con los enfoques metodológicos para evaluar las potencialidades de las diversas morfologías urbanas en relación con su mejor respuesta adaptativa ante el calentamiento global. La literatura internacional consultada proviene, fundamentalmente, de países desarrollados y regiones de clima frío y templado, siendo escasos los estudios sobre regiones cálidas y en desarrollo como Cuba, razón que ha motivado la primera etapa de la investigación.

En el artículo, por tanto, se presentan los resultados de una discusión teórica a partir de los enfoques metodológicos, originalmente planteados en la literatura consultada, en aras de proponer el procedimiento a seguir en la investigación.

II. Materiales y métodos

El contenido que se presenta constituye parte de la primera etapa de la investigación, que se inició con una búsqueda bibliográfica sobre temas vinculados al calentamiento global derivado del cambio climático, tanto de manera general como en la región del Caribe y particularmente en Cuba; su impacto social, económico y ambiental; las interinfluencias con la arquitectura y el urbanismo, vistos como responsables parciales del calentamiento global que a la vez sufren su impacto; las mejores prácticas en relación con estrategias y soluciones de transformación, prin-

cialmente en regiones con condiciones similares a las del contexto cubano, y en particular, los procedimientos y herramientas usados para caracterizar, clasificar y evaluar las morfologías según sus problemas y potencialidades.

Los enfoques metodológicos identificados fueron caracterizados y clasificados según su alcance y objetivos, teniendo en cuenta sus posibilidades de aplicación en Cuba y en la investigación sobre la base de los recursos necesarios y disponibles. Los resultados de la discusión constituyeron el punto de partida para proponer el procedimiento a seguir en la caracterización, clasificación, evaluación y propuestas de transformación de las morfologías con la intención de una mejor adaptación del hábitat al calentamiento global en Cuba, lo cual será objeto de estudio en futuras etapas de la investigación.

III. Resultados y discusión

Con la finalidad de ordenar el análisis de la información recopilada, los enfoques metodológicos identificados se clasificaron según su alcance y objetivo en: métodos generales de evaluación; los correspondientes al análisis del ciclo de vida; las metodologías *ex ante* y *ex post*; los análisis multicriterio, multiobjetivo, multiescala o multiactoral; algunos índices de referencia; el análisis de los escenarios, y las ponderaciones de los expertos. También se comentaron algunos de los principales software empleados en los procedimientos; las formas de clasificar los tipos urbanos, así como métodos y herramientas específicos para evaluar el efecto de la *isla de calor* urbana. El análisis concluye con la fundamentación de la decisión tomada sobre el enfoque metodológico a seguir en la investigación, que difiere del inicialmente concebido en su diseño.

Métodos generales de evaluación

Entre los métodos generales de evaluación con mayor alcance por su integralidad, se encuentra el *índice de bienestar económico sustentable* (Index of Sustainable Economic Wellbeing, ISEW) empleado por Dos Santos *et al.* (2017) quienes ratifican lo inapropiado del PIB para evaluar el desarrollo.

Uno de los métodos de evaluación más comúnmente usado es el *análisis costo-beneficio*, que según Newbery (2002), consiste en la evaluación del objeto con y sin la propuesta de transformación proyectada.

En la mayoría de los casos, los métodos consultados se asocian con la evaluación integral de la sustentabilidad y la resiliencia del objeto de estudio o especialmente del consumo energético y el impacto ambiental. Algunos de ellos toman como base el concepto extendido de «metabolismo urbano», el cual ha evolucionado de un simple balance a un modelo más complejo que incluye productos intangibles. Tal es el caso de la *evaluación del impacto metabólico* (Metabolic Impact Assessment, MIA), empleado en el proyecto Metabolismo urbano sustentable para Europa (Sustainable Urban Metabolism for Europe, SUME), a través del cual se simuló el desarrollo urbano en siete grandes áreas metropolitanas europeas. El método intenta resolver la falta de información y definir límites, establece comparaciones para la validación y efectúa un análisis de sensibilidad. Se plantea la posibilidad de enfocarse en

un índice de eficiencia urbana (Urban Efficiency Index, UEI) en lugar de elaborar complejas matrices para mapear los resultados, con lo cual sería más fácil representar escenarios y metas (Caputo, 2019).

El enfoque de modelación *sistemas urbanos sustentables de agua y energía* (Sustainable Urban Energy and Water System, SUEWS) parte de los parámetros requeridos de ocupación del suelo para suponer, de forma emergente y con una mediana complejidad, el consumo de energía y agua a escala urbana. Se ha aplicado en la evaluación de cuatro ciudades (Dublín, Hamburgo, Melbourne y Phoenix) al reemplazar la ocupación del suelo establecida por las denominadas «zonas climáticas locales» (Local Climate Zone, LCZ) por fracciones reales detalladas, lo cual mejora el desempeño del modelo (Alexander *et al.*, 2016).

Entre los métodos generales para valorar la sustentabilidad se encuentran los de *evaluación de edificios verdes* (Green Building Assessment, GBA). Pan *et al.* (2022) identificaron 42 de ellos empleados a escala global y evaluaron en profundidad 12 ampliamente adoptados, atendiendo a las dimensiones de concepto, metodología y valoración, según una perspectiva múltiple. Aunque el objetivo de la investigación en curso no es la evaluación de la sustentabilidad urbana, sino del impacto del cambio climático, específicamente de la elevación de las temperaturas y las posibles medidas de adaptación del hábitat urbano, será necesario partir de un enfoque más amplio e integral, para lo cual las metodologías identificadas pueden servir como referencia.

En investigaciones precedentes, los autores de este trabajo han clasificado las diversas formas de evaluar la sustentabilidad referidas en la literatura internacional en tres tipos: las herramientas, los estándares y los sistemas de evaluación de edificios. Las herramientas de evaluación consisten en software que otorgan certificación y ayuda práctica al proyectista. Los estándares son habitualmente aceptados como sinónimo de buenas prácticas, mientras que los sistemas de evaluación establecen una gradación o calificación con respecto al cumplimiento de los indicadores de sustentabilidad (Pérez, 2019).

Los primeros sistemas de evaluación aparecieron en 1989, y ya en 2019 se registraban unos 330 a escala global. Pérez (2019) identificó 27 sistemas desarrollados en América, África, Europa, Asia y Australia, y para su aplicación en Cuba otorgó prioridad a los que provenían de países con un contexto similar en cuanto a nivel de desarrollo y clima: EEW (Taiwán, 1999), LEED-India (India, 2001), Terigriha (India, 2015), AQUA (Brasil, 2008), MyCrest (Malasia, 2010), PCES (México), Lotus (Vietnam, 2017) y GBI (Malasia).

Otros métodos generales identificados se dedican a la evaluación del consumo de energía y las correspondientes emisiones de CO₂. Entre ellos se encuentra el *modelo de gestión racional de la exergía* (Rational Exergy Management Model, REMM), aplicado por Kilis (2014) a distritos de exergía cero (net zero exergy), que son aquellos que producen tanta cantidad de energía como la consumida. Zhang *et al.* (2014) usan el *análisis de entrada-salida* (Input-Output Analysis) para calcular el flujo y el consumo (directo e indirecto) de energía embutida de las ciudades sobre la base del metabolismo, aunque el consumo indirecto generalmente no se evalúa por falta de datos. Esto

guarda una relación muy estrecha con los objetivos de la investigación en curso, en la cual se pretende evaluar el impacto del aumento de las temperaturas en el consumo de energía, así como el de las medidas de adaptación propuestas en su reducción.

Para evaluar la morfología urbana, Yu *et al.* (2021) proponen el método de *análisis de patrones espaciales morfológicos* (Morphological Spatial Patterns Analysis, MSPA) desde una perspectiva gráfica integradora que cambia la lógica de evaluación y mitigación de la *isla de calor*. En esta ocasión, se evoluciona del enfoque de «parches fragmentados» hacia una «concepción en red» a partir del pensamiento inverso. Se parte de que el método de las zonas climáticas locales (LCZ), en sus 17 categorías reconocidas, no considera la interconexión que realmente existe entre las diferentes zonas urbanas clasificadas. Estos autores proponen considerar una *isla de calor* regional, ya que los problemas térmicos y ambientales que se presentan a esa escala no pueden resolverse desde la perspectiva de una sola ciudad uniforme. Este enfoque es novedoso y puede ser muy real, pero se dificulta en las condiciones de la investigación para el hábitat urbano en Cuba por la imposibilidad de disponer de ciertos recursos tecnológicos como imágenes térmicas satelitales.

Palusci *et al.* (2022) demuestran que se ha incrementado el uso de métodos para evaluar el desempeño de la ventilación a escala urbana por su influencia en el efecto de la *isla de calor*, variando los enfoques metodológicos que se emplean en cada escala, según la clasificación establecida para las LCZ. La evaluación de las morfologías urbanas existentes y las acciones de transformación para una mejor adaptación al cambio climático resultan esenciales para la investigación en desarrollo, pero no se empleará la clasificación establecida por el método de las LCZ, ya bastante criticada, sino que se elaborará una a partir de criterios propios sobre la base de las variables que se discuten. Por otro lado, al reconocer las limitaciones de las LCZ a escala global, se pretende identificar a las morfologías reales existentes con vistas a monitorear y simular su comportamiento.

De manera general, son diversos los métodos que se emplean para evaluar el impacto de las soluciones urbanas y su transformación, usualmente asociados a la aplicación de software y otras técnicas como el manejo de imágenes satelitales a los cuales no es posible el acceso desde Cuba.

Análisis del ciclo de vida

El *análisis del ciclo de vida* (Life Cycle Analysis, LCA) es uno de los enfoques más usados que subyace en la mayoría de los métodos identificados y, según Nematchoua *et al.* (2019), es el mejor para evaluar el impacto ambiental del medio construido. Sin embargo, partiendo de reconocer que raramente se ha hecho un completo análisis del ciclo de vida en edificios en el contexto mediterráneo, Stephan *et al.* (2014) proponen para ello un marco multiescala.

Muy frecuentemente ese método se asocia también al análisis energético del ciclo de vida. En este sentido Gauk (2016) emplea tres categorías: la energía consumida en la producción de los materiales de construcción, la necesaria para el uso operacional de la vivienda y la empleada en los vehículos de transporte privado, lo cual aplica en la evaluación de 239 planes generales de ordenamiento urbano.

El análisis del ciclo de vida es uno de los enfoques metodológicos a emplear en la investigación en curso, fundamentalmente en la etapa de operación o explotación que define el consumo anual de energía.

Metodología ex ante y ex post

Lin (2021) plantea que es insuficiente el número de estudios relevantes sobre evaluación *ex ante*, en comparación con la gran cantidad de literatura que se concentra en la evaluación *ex post*, por lo que presenta un modelo del primer tipo para la toma de decisiones en la evaluación de la sustentabilidad de proyectos de renovación urbana sobre la base de la perspectiva de *toma de decisiones híbrida multiatributo* (Hybrid Multi-Attribute Decision Making, MADM), según las dimensiones que él considera clásicas: económica, social y cultural y ambiental. El proceso se desarrolla en tres etapas: cuestionario de expertos, exploración de las relaciones de interdependencia entre dimensiones, y obtención del peso relativo que tiene la influencia de cada aspecto (ponderación). Según el autor, se obtiene una evaluación precisa de la resiliencia urbana (ecológica, económica y social) y su evolución espacio-temporal a diferencia de las perspectivas estáticas predominantes.

Además, Buzási *et al.* (2021) ofrecen una metodología integrada *ex ante* para evaluar aspectos climáticos del proyecto de desarrollo urbano que incluye características locales específicas, estrategias relacionadas, objetivos y visiones. En la primera etapa se definen los principales aspectos de las intervenciones analizadas, en la segunda se establecen los criterios de evaluación y en la tercera se ofrece una puntuación mediante panel de expertos. Según el autor, el método es similar al empleado por el Foro Económico Mundial (World Economic Forum). La metodología a elaborar en la investigación en desarrollo contemplará este enfoque para hacer evaluaciones comparativas de diversos estados del objeto de estudio, antes y después de la puesta en práctica de las transformaciones propuestas.

Análisis multicriterio, multiobjetivo, multiescala o multiactoral

La tendencia a los análisis «multi» como método de evaluación es predominante. Por ejemplo, Buzási *et al.* (2021) emplean una metodología multicriterio para definir la compleja relación entre las acciones de renovación para la toma de decisiones. También Czapich *et al.* (2022) usan un método de evaluación multicriterio que se expresa mediante la *herramienta del indicador compuesto* (Composite Indicator Tool). Se trata de un método de análisis comparativo multivariado aplicado para evaluar la sustentabilidad de capitales europeas. Además, Luo *et al.* (2021) aplican una metodología multicriterio para la toma de decisiones en aras de manejar y ordenar escenarios sustentables.

A su vez, Bassolino *et al.* (2021) proponen un sistema multicriterio para evaluar la capacidad adaptativa de los espacios urbanos a la elevación de la temperatura, comenzando por la parametrización de las características físicas y morfológicas con respecto al confort ambiental. La verificación de las propuestas de diseño incluye ensayos para determinar sus contribuciones e identificar las mejores soluciones climáticamente adaptadas. La primera etapa

de trabajo consiste en la recopilación de información; la segunda en su análisis y procesamiento, con simulaciones del *factor de visión del cielo* (Sky View Factor, SVF); en la tercera se muestran, clasifican y comparan patrones urbanos homogéneos; en la cuarta se aplica la evaluación multicriterio de la capacidad adaptativa de los espacios urbanos, comenzando por las características físicas y morfológicas con respecto al confort ambiental con vistas a la definición de indicadores morfológicos; y en la quinta etapa se verifica el diseño mediante ensayos. Esta metodología coincide en gran medida con el enfoque previsto para la investigación en curso.

Campana *et al.* (2017) usan un modelo multiobjetivo sobre la base de un algoritmo genérico para minimizar los costos de ciclo de vida del sistema y maximizar las energías renovables y la cosecha de agua mediante simulaciones dinámicas con el objetivo de optimizar el planeamiento de distritos urbanos residenciales. Stephan *et al.* (2014) ofrecen un marco multiescala para el análisis energético del ciclo de vida de edificios en el Mediterráneo, como resultado de lo cual se proponen acciones urbanas inmediatas y estrategias a largo plazo.

Gandini *et al.* (2021) reconocen que la reducción de desastres y adaptación al cambio climático requieren una perspectiva holística multiescala y presentan un enfoque metodológico integral multiactoral a escala de ciudad. También Mouzourides *et al.* (2019) aplican un análisis multiescala con datos validados de la demanda energética y establecen un vínculo entre las características de la forma urbana (como el parámetro dinámico de la «ciudad respirable», la altura de los edificios y la densidad) y la demanda energética asociada por calefacción y enfriamiento. Los análisis múltiples tendrán que ser necesariamente empleados en las metodologías a proponer en la investigación en desarrollo, con un enfoque holístico que considere, a diferentes escalas, diversas dimensiones, variables, parámetros e indicadores.

Análisis de escenarios

El análisis y construcción de escenarios es otro método muy común que generalmente aparece combinado con algunos de los ya mencionados. Por ejemplo, Buzási *et al.* (2021) lo emplean para evaluar las posibles consecuencias de una intervención de transformación en el desempeño urbano. Vermeiren *et al.* (2022) elaboraron tres escenarios para evaluar la expansión urbana de ciudades hasta el 2050 mediante un mapa calculado para cada una con los costos actuales y futuros en diversos plazos (2016, 2025, 2035 y 2050). Los tres escenarios de crecimiento consisten en el intensivo al ritmo actual, uno neutral y otro casi nulo denominado antiextensión.

Kilkis (2014) evalúa el índice de *opción de distrito exergía cero* (Net Zero Exergy District Option Index, NOEDO) en cinco escenarios. A su vez, el índice *térmico universal* (Universal Thermal Index, UTI) es calculado por Batista (2016) para el escenario actual y futuro desarrollo propuesto. El método empleado por Caputo (2019), *evaluación del impacto metabólico* (Metabolic Impact Assessment, MIA), se enfoca en el *índice de eficiencia urbana* (Urban Efficiency Index, UEI) para fácilmente representar escenarios y me-

tas. Por otro lado, Gauk (2016) identifica cuatro escenarios para el análisis energético del ciclo de vida de 239 planes generales urbanos: DD (desarrollo disperso), DDEE (desarrollo disperso energéticamente eficiente), DC (desarrollo compacto) y DCEE (desarrollo compacto energéticamente eficiente). La construcción de escenarios será una herramienta clave en el procedimiento a emplear en la investigación en curso, de manera que sea posible evaluar el impacto del cambio climático en diversos escenarios con y sin las transformaciones propuestas.

Ponderación de expertos

El método de expertos aparece con diversas formas en algunas de las fuentes consultadas. En la tercera etapa de su metodología integrada *ex ante* para evaluar aspectos climáticos del proyecto de desarrollo urbano, Buzási *et al.* (2021) asignan puntos a los aspectos evaluados mediante panel de expertos. Lin (2021), por el contrario, les aplica el cuestionario en la primera etapa de su método *ex ante*, sobre la base de una perspectiva de *toma de decisiones híbrida multiatributo* (Hybrid Multi-Attribute Decision Making, MADM), mientras que Luo *et al.* (2021) definen el peso de las variables de la metodología multicriterio para la toma de decisiones a partir de la consulta de expertos. Por lo complejo y discutible de los métodos de expertos, será necesario valorar su conveniente aplicación en las próximas etapas de este estudio o la posibilidad de arribar a criterios de ponderación por otras vías.

Métodos y herramientas para evaluar el efecto de la isla de calor urbana

Martilli *et al.* (2020) estudiaron el fenómeno de la *isla de calor urbana* (Urban Heat Island, UHI) y sugieren el término «mitigación del calor urbano» para describir con mayor precisión las estrategias destinadas a enfriar las ciudades. Tan *et al.* (2016) investigaron el efecto de la vegetación asociada al SVF para mitigar la UHI en Hong Kong, señalando que el software ENVI-met es una herramienta fiable.

En otras investigaciones, como la llevada a cabo por Breghatto (2015), se evalúan, mediante modelaciones numéricas realizadas con el software ENVI-met, las consecuencias de la verticalización de las ciudades, no solo en el efecto de *isla de calor* sino también en la contaminación urbana. Renganathan y Rohinton (2018) realizaron una revisión del estado del arte en relación con la intensidad de UHI, su influencia en el consumo de energía de los edificios y el efecto de las urbanizaciones compactas en el trópico. Estos autores refieren que el método más común, y más ampliamente aceptado, para modelar la UHI tropical es ENVI-met.

Según Segovia y Morillón (2022), para evaluar el efecto de la UHI, se utilizan métodos como comparación de datos climatológicos entre estaciones urbanas, suburbanas y rurales; recorridos con vehículos instrumentados en trayectos previamente planeados para identificar procesos que ocurren dentro de los 200 m en el espacio; análisis de imágenes satelitales en las bandas térmicas infrarrojas, y vehículos aéreos no tripulados para el análisis mediante imágenes termográficas.

Para evaluar la sensación térmica y las condiciones de confort en espacios exteriores se emplean índices como la

temperatura fisiológicamente equivalente (Physiologically Equivalent Temperature, PET) y el *índice climático térmico universal* (Universal Thermal Climate Index, UTCI), usando software como el RayMan Pro, que calcula para invierno y verano los parámetros SVF, sombra arrojada, horas de sol y temperatura media radiante (T_{mr}), según la orientación de la calle y la *sección de vía* (Aspect Ratio, H/D) del cañón urbano. Estos modelos e indicadores han sido bastante empleados (Pearlmutter *et al.*, 2014; Giannaros *et al.*, 2015; Xiaodong *et al.*, 2015), incluso en investigaciones para Cuba (Rodríguez *et al.*, 2015; Rodríguez *et al.*, 2016). También están disponibles otros modelos libres como SkyHelios, ENVI-met y Solweig (Fröhlich y Matzarakis, 2013).

Salvati *et al.* (2016) evaluaron la precisión del *generador del tiempo urbano* (Urban Weather Generator, UWG), un modelo desarrollado para generar ficheros climáticos urbanos a partir de datos climáticos rurales con vistas a mejorar la precisión de la simulación energética de edificios en el contexto urbano. La predicción del UWG fue capaz de captar la tendencia media diaria del efecto *isla de calor* urbana, por lo que podría permitir una mejora significativa de las simulaciones energéticas en el contexto urbano, dando un archivo meteorológico más preciso con respecto a la temperatura de la estación meteorológica que usualmente se emplea.

También se han realizado simulaciones encaminadas a mejorar la resiliencia de las ciudades en diversos escenarios posibles del cambio climático. Tal es el caso del estudio realizado por Gilabert (2021) para tres escenarios potenciales:

1. Aumentando el albedo de las cubiertas a 0,85 para ciertas zonas.
2. Incrementando la vegetación en 255,64 ha adicionales.
3. Combinando las anteriores estrategias de mitigación (1 y 2).

Las técnicas de teledetección introducen un nuevo punto de vista para comprender la UHI, utilizando la *temperatura de la superficie terrestre* (Land Surface Temperature, LST) (Hu y Brunsell, 2013). Los resultados de una revisión bibliográfica realizada por Deilami *et al.* (2018) muestran que el 54 % de los estudios utilizaron imágenes Landsat; los índices de cobertura del suelo (46 %), seguidos de la clasificación supervisada (17 %) fueron los métodos dominantes para derivar los cambios de cobertura-uso del suelo; la regresión por mínimos cuadrados ordinarios es el método más aplicado (68 %) para investigar la relación entre los diferentes factores espacio-temporales y el efecto UHI, seguido del análisis comparativo (33 %); los factores más comunes que afectan al efecto UHI incluyen la cubierta vegetal (44 %), la estación del año (33 %), la superficie construida (28 %), el día y la noche (25 %), la densidad de población (14 %) y las masas de agua (12 %), entre otros.

Consideraciones sobre los métodos identificados

En la Tabla 1 se resumen los métodos para la evaluación de la sustentabilidad, el ambiente térmico y el consumo de energía de soluciones urbanas y arquitectónicas, pro-

puestos en la literatura consultada con su denominación en inglés, que generalmente es la original, y la sigla que los identifica. Como se observa, predominan los enfoques múltiples y tanto el análisis de escenarios como la ponderación mediante consulta a expertos, constituyen procedimientos complementarios que se combinan con otros.

En la bibliografía consultada sobre enfoques metodológicos para evaluar las consecuencias del cambio climático

en ciudades y medidas de adaptación, no fue posible diferenciar metodologías específicas para evaluar impactos con respecto a otras usadas para el análisis costo-beneficio. Por tanto, en la investigación en curso, se diseñarán escenarios futuros para ser evaluados anterior y posteriormente a las transformaciones propuestas, con el propósito de caracterizar los impactos si estas no se aplican, y los beneficios de su implementación.

Tabla 1. Métodos de evaluación de las soluciones urbanas y arquitectónicas referidos por los autores consultados

Autor	Método				
	Sigla	Inglés	Español	Análisis de escenarios	Ponderación de expertos
Newbery (2002)			Análisis costo-beneficio		
Caputo (2019)	MIA	Metabolic Impact Assessment	Evaluación del impacto metabólico		
Alexander <i>et al.</i> (2016)	SUEWI	Sustainable Urban Energy and Water System	Sistemas urbanos sustentables de agua y energía		
Pan <i>et al.</i> (2022)	GBA	Green Building Assessment	Evaluación de edificios verdes		
Pérez (2019)			Procedimiento para la evaluación de la sustentabilidad de comunidades rurales ecoturísticas		
Kilkis (2014)	REMM	Rational Exergy Management Model	Modelo de gestión racional de la exergía		
Zhang <i>et al.</i> (2014)		Input-Output Analys	Análisis de entrada-salida		
Yu <i>et al.</i> (2021)	MSPA	Morphological Spatial Patterns Analysis	Análisis de patrones espaciales morfológicos		
Nematchoua <i>et al.</i> (2019)	LCA	Life Cycle Analysis	Análisis del ciclo de vida		
Stephan <i>et al.</i> (2014)					
Gauk (2016)					
Lin (2021)	MADM	Hybrid Multi-Attribute Decision Making	Toma de decisiones híbrida multiatributo		
			Evaluación <i>ex post</i>		
			Evaluación <i>ex ante</i>		
Buzási <i>et al.</i> (2021)			Metodología integrada <i>ex ante</i>		
Bassolino <i>et al.</i> (2021)			Sistema multicriterio		
Campana <i>et al.</i> (2017)			Modelo multiobjetivo		
Stephan <i>et al.</i> (2014)			Análisis energético del ciclo de vida		
			Marco multiescala		
Gandini <i>et al.</i> (2021)			Perspectiva holística multiescala		
			Enfoque metodológico integral multiactoral		
Mouzourides <i>et al.</i> (2019)			Análisis multiescala		
Peponi <i>et al.</i> 2022	MLP	Trained Multilayer Perception	Percepción multicapas entrenada		
Batista (2016)					
Vermeiren <i>et al.</i> (2022)					
Luo <i>et al.</i> (2021)					

Índices

Es muy común el trabajo con índices de diferentes tipos, algunos de los cuales se aplican en las metodologías mencionadas. Por ejemplo, Wua *et al.* (2021) mapean de forma automática, mediante imágenes satelitales, las tipologías relevantes de techos urbanos a partir de lo cual obtienen un índice. A su vez Luo *et al.* (2021) elaboran un sistema de indicadores de evaluación para la toma de decisiones a partir de cinco dimensiones (económica, ambiental, social, tecnológica y energética).

Para evaluar el desarrollo urbano, las acciones de renovación y la toma de decisiones Buzási *et al.* (2021) emplean índices complejos de desempeño ambiental, partiendo de más de 40 indicadores, que incluyen movilidad y proximidad a las zonas socioculturales, para definir 14 indicadores y 63 subcategorías.

Para cuantificar la integridad del ecosistema urbano contrastando las variables físicas y biológicas con valores de referencia, MacGregor-Fors *et al.* (2021) usan el índice de integridad del *ecosistema urbano* (Urban Ecosystem Integrity Index, UEII) el cual es una herramienta flexible y fácil de calcular. A su vez, como se ha mencionado, Czapich *et al.* (2022) emplean la *herramienta de indicador compuesto* (Composite Indicator Tool) o evaluación multicriterio donde no se agregan los indicadores. Estos autores reconocen que la construcción de indicadores sintéticos es un proceso complejo con cierta incertidumbre y que un método alternativo se basa en usar indicadores absolutos que se comparan con una referencia. Para ello se requiere una combinación de procesos cuantitativos y cualitativos.

También Elavarasan *et al.* (2022) aplican un *índice compuesto* (Composite Index) novedoso para evaluar el desempeño energético sustentable correspondiente al Objetivo de Desarrollo Sostenible 7 (ODS 7) en 40 ciudades europeas. El enfoque metodológico integral-multiactorial, propuesto por Gandini *et al.* (2021), genera un único índice de riesgo que se expresa en una representación gráfica 3D. Peponi *et al.* (2022) usan indicadores multidimensionales para manejar la complejidad de los procesos urbanos y mejorar su resiliencia a partir del concepto de metabolismo urbano inteligente y regenerativo, acoplando el pensamiento del ciclo de vida y el aprendizaje mecánico (machine learning) para construir una red del tipo *percepción multicapas entrenada* (Trained Multi-layer Perception, MLP).

Kilkis (2014) emplea el *índice de opción de distrito de exergía cero* (Net Zero Exergy District Option Index NOE-DOI) como concepto piloto para la primera fase del proyecto, teniendo en cuenta la carga eléctrica anual y la carga térmica. A su vez, Batista (2016) usa el índice térmico *universal* (Universal Thermal Index, UTI) para evaluar el impacto de un nuevo complejo de edificios, como resultado del proceso de redensificación, en el desempeño térmico y energético del contexto urbano en Roma. Caputo (2019) acude al índice de *eficiencia urbana* (Urban Efficiency Index, UEI) para evaluar el desempeño de un territorio de $100 \times 100 \text{ m}^2$ en los alrededores de Milán: resume y evalúa la movilidad, la densidad urbana, la fragmentación, los residuos municipales no reciclados, la capacidad del ecosistema de servicio, la vulnerabilidad (social y económica) y la intensidad energética de la economía.

Bassolino *et al.* (2021) proponen el *índice de diseño climático adaptativo para el ambiente construido* (Climate Adaptive Design Index for the Built Environment, CADI-BE) con vistas a evaluar el desempeño de los espacios urbanos abiertos debido al incremento de la temperatura global y su efecto en la *isla de calor*; también define indicadores morfológicos. La metodología de evaluación a proponer en la investigación en curso no deberá perseguir la síntesis de la evaluación de diversas variables en un indicador único e integrado, que además de resultar complejo, no logra expresar la multiplicidad de problemas y soluciones. No se trata de comparar para encontrar las mejores respuestas, sino de valorar diversas posibles variantes o tipos morfológicos para proponer las transformaciones más apropiadas para la adaptación de cada uno al calentamiento global.

En la Tabla 2 se resumen los índices utilizados como referencia en la literatura consultada para evaluar las soluciones arquitectónicas y urbanas. Como se observa, son múltiples y diversos, pero lo más importante, es que han sido elaborados para su aplicación en regiones desarrolladas con climas fríos, por lo cual, sus valores deberán ser revisados para las condiciones de países tropicales y en desarrollo como Cuba (Rodríguez *et al.*, 2016). El SVF que caracteriza un parámetro de partida muy específico, es uno de los más utilizados y podrá emplearse en la investigación en desarrollo, solo que su estimación se hará por métodos tradicionales de análisis geométrico bidimensional y tridimensional, según los recursos disponibles.

Programas informáticos empleados

Estos métodos de evaluación, construcción de índices y elaboración de escenarios, generalmente usan sistemas automatizados y bases de datos a partir del empleo de numerosas y diversas aplicaciones informáticas. Por ejemplo, Nematchoua *et al.* (2019) utilizan los programas Alcyone, Comfie-Pleiades y Novoa-Equer, así como la base de datos suiza Ecoinverter 2018 para cuantificar los daños ambientales y costos de prevención generados por un barrio sustentable en un ciclo de vida de 80 años. El propio autor usa otros programas para evaluaciones específicas del *potencial de calentamiento global* (Global Warming Potential, GWP) para el efecto invernadero, *potencial de acidificación* (PA), *potencial de reducción abiótica* (ADP), *potencial de reducción eurófica* (Europhic Diminish Potential, ADP), *potencial de reducción de ozono* (Ozone Diminish Potential, ODP), *Años de vida ajustados por discapacidad* (Disability Adjusted Life Years, DALY) y *valor del umbral del olor* (Odour Threshold Value, OTV) para estos parámetros.

Vermeiren *et al.* (2022) emplean el método *modelo de uso geodinámico del suelo* (GeoDynamix Land Use Model) que simula el futuro uso del suelo a partir de una matriz de tipos urbanos. A su vez, el SVFEngine combina la modelación morfológica y las técnicas de geometría computacional para obtener el *factor de visión del cielo* (Liang *et al.*, 2017). En las condiciones de Cuba será difícil aspirar al empleo de software y herramientas de alta tecnología como imágenes satelitales, por tanto, los métodos de evaluación a emplear en las siguientes etapas de la investigación se adecuarán a las posibilidades reales en cuanto a equipos de medición y software disponibles.

Tabla 2. Índices de referencia para evaluar las soluciones urbanas y arquitectónicas empleados por los autores consultados

Autor	Índices		
	Sigla	Inglés	Español
Dos Santos <i>et al.</i> (2017)	ISEW	Index of Sustainable Economic Wellbeing	Índice de bienestar económico sustentable
Caputo (2019)	UEI	Urban Efficiency Index	Índice de eficiencia urbana
Kilkis (2014)	NOEDOI	Net Zero Exergy District Option Index	Índice de opción de distrito de exergía cero
Buzási <i>et al.</i> (2021)			Índice complejo de desempeño ambiental
Czupich <i>et al.</i> (2022)		Composite Indicator Tool	Herramienta del indicador compuesto
Bassolino <i>et al.</i> (2021)		Sky View Factor	Factor de visión del cielo
		Climate Adaptative Design Index for the Built Environment	Índice de diseño climático adaptativo para el ambiente construido
			Indicadores morfológicos
Gandini <i>et al.</i> (2021)			Único índice de riesgo
MacGregor-Fors <i>et al.</i> (2021)	UEII	Urban Ecosystem Integrity Index	Índice de integridad del ecosistema urbano
Elavarasan <i>et al.</i> (2022)		Composite Index	Índice compuesto
Peponi <i>et al.</i> (2022)			Indicadores multidimensionales
Batista (2016)	UTI	Universal Thermal Index	Índice térmico universal
Vermeiren <i>et al.</i> (2022)		Geodynamic Land Use Model	Modelo de uso geodinámico del suelo
Liang <i>et al.</i> (2017)	SVF	Sky View Factor	Ángulo de visión del cielo
Tan <i>et al.</i> (2016)			
Matzarakis (2007)	PET	Physiologically equivalent temperature	Temperatura fisiológicamente equivalente

Clasificación de tipos urbanos

En muchos de los métodos e indicadores identificados se emplean diversas formas de clasificación de tipos urbanos, ya que la arquitectura y el urbanismo constituyen el objeto de estudio evaluado. Por ejemplo, Vermeiren *et al.* (2022) usan una matriz de tipos urbanos clasificados según su densidad, mientras que Gauk (2016) propone escenarios para el análisis energético del ciclo de vida de planes urbanos a partir de la compacidad o dispersión del desarrollo y la eficiencia energética. Mouzourides *et al.* (2019), mediante un análisis multiescala, establecen un vínculo entre las características de la forma urbana y la densidad con la demanda energética por calefacción y enfriamiento.

Hachem-Vermette *et al.* (2022) proponen 12 tipos de agrupaciones de edificios (building clusters), con diferentes densidades, para reflexionar sobre las prácticas en Norteamérica y como base para una metodología en aras

de explorar las combinaciones más cercanas a lo óptimo en cuanto al uso de energías renovables y recursos alternativos. Para evaluar la capacidad adaptativa de los espacios exteriores urbanos, Bassolino *et al.* (2021) comienzan por la parametrización de sus características físicas y morfológicas con respecto al confort ambiental.

El *factor de visión del cielo* constituye una vía de clasificación morfológica que se puede realizar de forma automatizada mediante el SVFEngine (Liang, *et al.*, 2017). Alexander *et al.* (2016) reemplazan la documentación de las LCZ por caracterizaciones más detalladas, con lo cual se mejora el desempeño del modelo. Palusci *et al.* (2022) reconocen una tendencia a densificar el tejido urbano en las últimas décadas y elaboran clasificaciones morfológicas para evaluar el comportamiento de la vegetación que contribuye a mitigar los efectos negativos.

Gandini *et al.* (2021) clasifican las tipologías según los resultados de la evaluación de la vulnerabilidad a partir

de un único índice de riesgo. Mobaraki *et al.* (2022) reconocen la relación recíproca entre la morfología y la forma urbana sustentable mediante un modelo conceptual que toma la teoría cualitativa como metodología para establecer la tipo-morfología y el concepto de escala jerárquica. Estos autores afirman que cada simple componente de la forma urbana sustentable interactúa significativamente con el enfoque tipo-morfológico y elaboran un análisis geométrico de la morfología urbana desde el punto de vista de la sustentabilidad.

La clasificación de tipos urbanos constituirá un importante resultado de la investigación en curso a partir de las variables que condicionan el impacto del calentamiento global en el microclima urbano, el bienestar de las personas y el consumo de energía en las edificaciones, así como las posibles vías de mitigación y adaptación.

IV. Conclusiones

A partir de la investigación teórica realizada, los métodos de evaluación de los problemas y potencialidades que presentan las morfologías urbanas para adaptarse al calentamiento global que se aplicarán en la investigación en curso, se ajustarán a la información y las tecnologías disponibles en Cuba.

La clasificación de las morfologías urbanas existentes en las ciudades cubanas y la selección de las que serán objeto de estudio en las siguientes etapas de la investigación, se realizará a partir de criterios adecuados a las particularidades locales (económicas, sociales y ambientales) según una evaluación cualitativa preliminar de zonas homogéneas, con el propósito de alcanzar el monitoreo y simulación de su desempeño real.

El monitoreo del desempeño térmico de las morfologías objeto de estudio servirá como información de partida para simular su comportamiento anterior y posterior en diversos escenarios, todo ello con el propósito de realizar un análisis costo-beneficio de las transformaciones propuestas, lo que permitirá alcanzar una mejor adaptación al calentamiento global de cada morfología urbana identificada.

La metodología a emplear para evaluar las morfologías urbanas en las siguientes etapas de la investigación no empleará un único indicador de referencia integrado, lo cual resulta complejo e innecesario, ya que no se trata de comparar tipos con el propósito de identificar el mejor, sino de evaluar para diversos escenarios los beneficios en función de los costos de las transformaciones específicas a realizar en cada uno, según sus particularidades, para una mejor adaptación al calentamiento global.

V. Referencias bibliográficas

- Alexander, P. J., Bechtel, B., Chow, W. T. L., Fealy, R. y Mills, G. (2016). Linking urban climate classification with an urban energy and water budget model: Multi-site and multi-seasonal evaluation. *Urban Climate* 17 (2016) 196–215. <http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2016.08.003>
- Bassolino, E. y Cerreta, M. (2021). Climate Adaptive Design Index for the Built Environment (CADI-BE): An Assessment System of the Adaptive Capacity to Urban Temperatures Increase. *Energies* 2021, 14, 4630. <https://doi.org/10.3390/en14154630>
- Batista, R. J. R., Goncalves, F., Portofrío da Oxa, R. (2016). *Present Climate and future projections of the thermal comfort index for the metropolitan region of Sao Paulo, Brazil*. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1690-5>
- Bregiatto de Oliveira, P. dos S., Astigarraga, R., Borelli, G., Saiz, P. J. y Nader, G. (2015). Consequences of verticalization. Proceedings of the 31st International Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA 2015). Bologna, Italia. <http://plea-arch.org/plea-proceedings/>
- Buzási, A., Pálölyi, T. y Csete, M. S. (2021). Assessment of climate change performance of urban development projects – Case of Budapest, Hungary. *Cities* 114 (2021) 103215. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2021.103215>
- Campana, P. E., Quan, S. J., Robbio, F. I., Lundblad, A., Zhang, Y., Ma, T., Karlsson, B y Yan, J. (2017). Optimization of a residential district with special consideration on energy and water reliability. *Applied Energy* 194 (2017) 751–764. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.005>
- Caputo, P., Pasetti, G. y Ferrari, S. (2019). Implementation of an urban efficiency index to comprehend post-metropolitan territories—The case of Greater Milan in Italy. *Sustainable Cities and Society* 48 (2019) 101565. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101565>
- Czupich, M., Łapinska, J. y Bartos, V. (2022). Environmental Sustainability Assessment of the European Union's Capital Cities. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2022, 19, 4327. <https://doi.org/10.3390/ijerph19074327>
- Deilami, K., Kamruzzaman y Liu, Y. (2018). Urban heat island effect: A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 67, 30. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.12.009>
- Dos Santos Gaspara, J., Cardoso Marquesb, A. y Fuinhas, J. A. (2017). The traditional energy-growth nexus: A comparison between sustainable development and economic growth approaches. *Ecological Indicators* 75 (2017) 286–296. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.048>
- Elavarasan, R. M., Pugazhendhi, R., Irfan, M., Mihet-Popa, L., Campana, P. E. y Khan, I. A. (2022). A novel Sustainable Development Goal 7 composite index as the paradigm or energy sustainability assessment: A case study from Europe. *Applied Energy* 307 (2022) 118173. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118173>
- Fröhlich, D. y Matzarakis, A. (2013). Modeling of changes in thermal bioclimate: examples based on urban spaces in Freiburg, Germany. *Theor Appl Climatol* (2013) 111:547–558. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0678-y>
- Gandini, A., Quesada, L., Prieto, I. y Garmendia, L. (2021). Climate change risk assessment: A holistic multi-stakeholder methodology for the sustainable development of cities. *Sustainable Cities and Society* 65 (2021) 102641. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102641>
- Gauk, M. y Roose, A. (2016). Assessing the energy intensity of peri-urbanisation: A master plan approach. *Energy and Buildings* 128 (2016) 540–552. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.003>
- Giannaros, T. M., Melas, D. y Matzarakis, A. (2015). Evaluation of thermal bioclimate based on observational data and numerical simulations: an application to Greece. *Int J Biometeorol*, (59), 151–164. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0832-6>

- Gilabert Mestre, J. (2021). *Cubiertas urbanas y comportamiento térmico en escenarios de temperaturas extremas del dato al geoservicio* [Tesis doctoral]. Universidad de Barcelona. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=304379>
- Hachem-Vermettea, C. y Singh, K. (2022). Optimization of the mixture of building types in a neighbourhood and their energy and environmental performance. *Energy&Buildings* 204(2019) 109499. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109499>
- Hu, L. y Brunsell, N.A. (2013). The impact of temporal aggregation of land surface temperature data for surface urban heat island (SUHI) monitoring. *Remote Sensing of Environment* 134 (2013) 162–174. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.02.022>
- Kilkis, S. (2014). Energy system analysis of a pilot net-zero exergy district. *Energy Conversion and Management* 87 (2014) 1077–1092. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.014>
- Liang, J. Gongga, J., Sun, J. and Liu, J. (2017). A customizable framework for computing sky view factor from large-scale 3D city models. *Energy and Buildings* 149 (2017) 38–44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.024>
- Lin, S. H., Huang, X., Fu, G., Chen, J. T., Zhao, X., Li, J. H. y Tzeng, G. H. (2021). Evaluating the sustainability of urban renewal projects based on a model of hybrid multiple-attribute decision-making. *Land Use Policy* 108 (2021) 105570. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105570>
- Luo, C., Ju, Y., Giannakis, M., Dong, P. y Wang, A. (2021). A novel methodology to select sustainable municipal solid waste management scenarios from three-way decisions perspective. *Journal of Cleaner Production* 280 (2021) 124312. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124312>
- MacGregor-Fors, I., Falfán, I., García-Arroyo, M., Lemoine-Rodríguez, R., Gómez-Martínez, M. A., Marín-Gómez, O. H., Pérez-Maqueo, O. y Equihua, M. (2021). A Novel Approach for the Assessment of Cities through Ecosystem Integrity. *Land* 2022, 11, 3. <https://doi.org/10.3390/land11010003>
- Martilli, A., Krayenhoff, E. S., y Nazarian, N. (2020). Is the Urban Heat Island intensity relevant for heat mitigation studies? *Urban Climate*, 31, 100541. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100541>
- Mobaraki, A. y Oktay Vehbi, B. A. (2022). Conceptual Model for Assessing the Relationship between Urban Morphology and Sustainable Urban Form. *Sustainability* 2022, 14, 2884. <https://doi.org/10.3390/su14052884>
- Mouzourides, P., Kyprianou, A., Neophytou, M. K. A., Ching, J. y Choudhary, R. (2019). Linking the urban-scale building energy demands with city breathability and urban form characteristics. *Sustainable Cities and Society* 49 (2019) 101460. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101460>
- Nematchoua, M. K. y Reiter, S. (2019). Analysis, reduction and comparison of the life cycle environmental costs of an eco-neighbourhood in Belgium. *Sustainable Cities and Society* 48 (2019) 101558. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101558>
- Newbery, D. M. (2002). Spatial General Equilibrium and Cost-Benefit Analysis. *Cost-Benefit Analysis: Environmental and Ecological Perspective*. London and New York: Routledge Taylor and Francis Group.
- Palusci, O. y Cecere, C. (2022). Urban Ventilation in the Compact City: A Critical Review and a Multidisciplinary Methodology for Improving Sustainability and Resilience in Urban Areas. *Sustainability* 2022, 14, 3948. <https://doi.org/10.3390/su14073948>
- Pan, W., Yu, C. y Du, J. (2022). A dialectical system framework for green building assessment in high-density cities. *Environmental Impact Assessment Review* 97 (2022) 106860. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106860>
- Pearlmutter, D., Jiao, D. y Garb, Y. (2014). The relationship between bioclimatic thermal stress and subjective thermal sensation in pedestrian spaces. *Int J Biometeorol* (58), 2111–2127. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0812-x>
- Peponi, A., Morgado, P. y Kumble, P. (2022). Life cycle thinking and machine learning for urban metabolism assessment and prediction. *Sustainable Cities and Society* 80 (2022) 103754. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103754>
- Pérez Rosales, R. A. (2019). *Procedimiento para evaluar la sostenibilidad de destinos ecoturísticos vinculados a comunidades rurales. Caso de estudio: Hotel Moka, Comunidad Las Terrazas* [sin publicar]. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana.
- Renganathan, G. y Rohinton, E. (2018). The impact of urban compactness, comfort strategies and energy consumption on tropical urban heat island intensity: a review. *Sustainable Cities and Society* 937. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.024>
- Rodríguez, J., Coch, H., De la Paz, G., Yeras, M. y Matzarakis, A. (2015). Human thermal comfort conditions and urban planning in hot-humid climates - The case of Cuba. *International Journal of Biometeorology*, 59(12), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s00484-015-1109-4>
- Rodríguez Algeciras, J. A., Gómez Consuegra, L. y Matzarakis, A. (2016). Spatial-temporal study on the effects of urban street configurations on human thermal comfort in the world heritage city of Camagüey-Cuba. *Building and Environment* 101 (2016) 85e101. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.02.026>
- Salvati, A., Coch Roura, H. y Cecere, C. (2016). Urban heat island prediction in the mediterranean context: an evaluation of the urban weather generator model. *ACE: Architecture, City and Environment*, 11 (32): 135-156, 2016. <https://doi.org/10.5821/ace.11.32.4836>
- Segovia A. y Morillón, D. (2022). *Análisis de la isla de calor urbana: Nuevos métodos y tecnologías*. Instituto de Ingeniería UNAM. <http://www.ii.unam.mx/es-mx/Investigacion/Proyecto/Paginas/analisis-isla-calor-urbana.aspx>
- Stephan, A. y Stephan, L. (2014). Reducing the total life cycle energy demand of recent residential buildings in Lebanon. *Energy* 74 (2014) 618e637. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.07.028>
- Tan, Z., Ka-Lun Lau, K. y Nga, E. (2016). Urban tree design approaches for mitigating daytime urban heat island effects in a high-density urban environment. *Energy and Buildings*, (114), 265–274. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.031>
- Vermeiren, K. Crols, T., Uljee, I., De Nocker, L. Beckx, C., Pisman, A., Broekx, S. y Poelmans, L. (2022). Modelling urban sprawl and assessing its costs in the planning process: A case study in Flanders, Belgium. *Land Use Policy* 113 (2022) 105902. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105902>

- Wua, A. N. y Biljecki, F. (2021). Roofpedia: Automatic mapping of green and solar roofs for an open roofscape registry and evaluation of urban sustainability. *Landscape and Urban Planning* 214 (2021) 104167. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104167>
- Xiaodong, He *et al.* (2015). Influence of sky view factor on outdoor thermal environment and physiological equivalent temperature. *Int J Biometeorol*, (59), 285–297. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0841-5>
- Yu, Z., Zhang, J., Yang, G. y Schlager, J. (2021). New Method from the Graph Perspective for Evaluating and Mitigating Regional Surface Heat Islands. *Remote Sens.* 2021, 13, 1127. <https://doi.org/10.3390/rs13061127>
- Zhang, Y., Zheng, H. y Fath, B. D. (2014). Analysis of the energy metabolism of urban socioeconomic sectors and the asso-

ciated carbon footprints: Model development and a case study for Beijing. *Energy Policy* 73 (2014) 540–551. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2014.04.029>

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

Contribución de los autores: Dania González Couret, conceptualización, curación de datos, investigación, metodología, redacción-borrador original, redacción-revisión y edición; Guillermo Antonio de la Paz Pérez, investigación, redacción-borrador original; Natalí Collado Baldoquín y Luis Alberto Rueda Guzmán, investigación.

Recibido: 2 de diciembre de 2022

Aceptado: 4 de diciembre de 2023