ISBN: 978-628-96613-1-6. ISSN: 2414-6390. Digital Object Identifier: https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2025.1.1.1179

Mitigating Urban Heat Islands through Green Infrastructure: A Review of Assessments, Simulation Models, and Efficiency in Urban Cooling

Eduardo Yupanqui Apolinario[1]; Eddy André Yupanqui Apolinario[2]; Sol Angel Rodríguez Carrillo[3]
[1]Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Industrial, Universidad Privada del Norte, Lima, Perú, *N00429472@upn.pe*
[2]Facultad de Ciencias, Ingeniería Metereológica y gestión de riesgos climáticos, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, *20211741@lamolina.edu.pe*
[3]Departamento de Ciencias, Universidad Privada del Norte, Lima, Perú, *sol.rodriguez@upn.edu.pe*

Abstract*– Cities are growing worldwide and the problem of Urban Heat Islands (UHI) is increasingly worrying due to human activities and climate change. Various studies propose urban green infrastructure as a sustainable and effective solution to mitigate UHI, especially in subtropical and warm cities. Based on this, the objective of this research is to collect information regarding the evaluation and mitigation methods of UHI in different cities around the world in the last 5 years (2020-2024). To this end, various strategies were analyzed, such as cool pavements, green and blue spaces. To this end, a search for information was carried out in the electronic databases of ScienceDirect, Google Scholar and Scopus, excluding articles based on established criteria and finally selecting fifteen relevant articles which were classified, ordered, analyzed and compared for their full-text evaluation. In conclusion, as cities continue to grow, they would face the challenge of climate change. Green infrastructure in conjunction with a sustainable urbanization plan can provide a comprehensive solution that would not only improve urban well-being and reduce temperatures, but would also contribute to achieving governments' sustainable development goals. Future studies should focus on evaluating and developing new green technologies and materials that improve the efficiency of green infrastructure and green and blue areas, as well as further simulations and analysis in cities with different climates and urban characteristics.

Keywords*-- Urban heat islands, Green Infrastructure, local climate zones, land surface temperature y mitigation strategies.

Mitigación de las Islas de Calor Urbanas a través de la Infraestructura Verde: Una Revisión de Evaluaciones, Modelos de Simulación y Eficiencia en el Enfriamiento Urbano

Eduardo Yupanqui Apolinario[1]; Eddy André Yupanqui Apolinario[2]; Sol Angel Rodríguez Carrillo[3]
[1]Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Industrial, Universidad Privada del Norte, Lima, Perú, *N00429472@upn.pe*
[2]Facultad de Ciencias, Ingeniería Metereológica y gestión de riesgos climáticos, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, *20211741@lamolina.edu.pe*
[3]Departamento de Ciencias, Universidad Privada del Norte, Lima, Perú, *sol.rodriguez@upn.edu.pe*

Resumen– ***Las ciudades crecen a nivel mundial y la problemática de las Islas de Calor Urbano (ICU) es cada vez más preocupante debido a las actividades humanas y el cambio climático, diversos estudios plantean la infraestructura verde urbana como una solución sostenible y efectiva para mitigar las ICU, especialmente en ciudades subtropicales y cálidas. En base a ello, el objetivo de esta investigación es recopilar información referente a los métodos evaluación y mitigación de las ICU en distintas ciudades del mundo en los últimos 5 años (2020-2024). Para ello se analizaron diversas estrategias como; pavimentos fríos, espacios verdes y azules. Para ello, se realizó la búsqueda de información en las bases de datos electrónicas de ScienceDirect, Google Scholar y Scopus, excluyendo artículos en base a criterios establecidos y seleccionando finalmente quince artículos relevantes los cuales fueron clasificados, ordenados, analizados y comparados para su evaluación de texto completo. En conclusión, a medida que las ciudades mantienen su crecimiento, estas se enfrentarían el desafío del cambio climático. La infraestructura verde en conjunto con un plan de urbanización sostenible puede proporcionar una solución integral que no solo mejora el bienestar urbano y reduciría las temperaturas, sino que también contribuiría al logro de los objetivos de desarrollo sostenible de los gobiernos. Los próximos estudios deben centrarse en evaluar y desarrollar nuevas tecnologías y materiales verdes que mejoren la eficiencia de la infraestructura verde y áreas verdes y azules, así como mayores simulaciones y análisis en ciudades con diferentes climas y características urbanas.***

Palabras clave—Islas de calor urbanas, Infraestructura verde, zonas climáticas locales, temperatura de la superficie terrestre y estrategias de mitigación.

I. Introducción

Los efectos del cambio climático y la urbanización, específicamente, las áreas urbanas están experimentando variaciones de temperaturas más altas en comparación con sus contrapartes rurales, lo que causa el efecto de isla de calor urbana (ICU), ello constituye una problemática la cual se busca mitigar mediante la infraestructura verde (IG) [1]. Las olas de calor representan riesgos significativos para la salud pública, debido a ello, el incremento de la cobertura vegetal es una estrategia eficaz para mitigar las ICU [2]. Estos eventos, avivados por el cambio climático, afectan las áreas urbanas, causando pérdidas económicas, sociales y ambientales sobre todo en terrenos con alta densidad poblacional y desarrollo urbano intensivo [3]. Así mismo, se ha explorado cómo las pequeñas infraestructuras verdes urbanas (UGI) menores a 2 hectáreas logran mitigar el fenómeno de las ICU y regular el microclima, especialmente en regiones densamente urbanizadas como Río de Janeiro [4]. También, se ha estudiado los factores de morfología urbana, superficies impermeables y actividades antropogénicas, utilizado dos enfoques para medir este fenómeno: la temperatura del aire y la temperatura de la superficie terrestre (LST), siendo esta última más utilizada por su capacidad para análisis espaciales a gran escala [5]. Además, la importancia de los espacios azules y verdes urbanos para mitigar el efecto de las ICU, proporcionando temperaturas más frescas en el ambiente y favoreciendo microclimas más cómodos, aunque el uso de estos espacios ha mostrado resultados positivos, el rápido desarrollo urbano limita su efectividad, sugiriendo que una red bien conectada de estas áreas podría mitigar los efectos térmicos negativos de una urbanización densa según el estudio desarrollado en la ciudad de Ghaemshahr, en Irán [6]. Así mismo, la LST ha mostrado un aumento en las últimas décadas, relacionado con la urbanización y el cambio climático, destacando la importancia de las áreas verdes y la planificación urbana para mitigar los efectos negativos de las islas de calor en el caso de Lima Metropolitana, la capital de Perú la cual enfrenta desafíos típicos de las

ciudades tropicales, como el aumento de temperaturas debido al cambio climático y el crecimiento urbano desordenado [7]. Además, Latinoamérica presenta las tasas de crecimiento urbano más altas del planeta e incluso hasta el 30% de la población total del país en las megaciudades, sin embargo, los pocos estudios desarrollados por los países de esta zona del planeta son preocupante y más aún en sus políticas de urbanización de los gobiernos [8]. Por otro lado, las ciudades tropicales experimentan un rápido crecimiento y urbanización, lo que lleva a una deforestación considerable y a la formación de ICU en el caso de la ciudad de Mérida, ubicada en la Península de Yucatán, se utilizaron datos de satélite Landsat y el algoritmo BFAST para identificar los patrones de deforestación entre los años 2000 y 2018, mostrando que la deforestación aumentó la temperatura de la superficie terrestre en áreas urbanizadas [9]. Sin embargo, el proceso de renovación urbana se ha convertido en un componente clave para el desarrollo sostenible, especialmente en países como China, donde se desarrollan políticas para transformar áreas deterioradas en espacios urbanos modernos, proponiendo diversas estrategias dentro de las renovaciones urbanas para reducir las ICU, como aumentar las áreas verdes, reducir las superficies impermeables, modificar la estructura y disposición de los edificios para mejorar la ventilación y reducir la acumulación de calor [10]. Además, este fenómeno genera problemas ambientales en el aire como partículas suspendidas PM 10 y PM 2.5 asociadas principalmente al tráfico vehicular, en este contexto se exploran estrategias de mitigación basada en infraestructura verde por simulaciones en un distrito industrial en Lombardía, Italia, concluyendo que los techos verdes extensivos son los más efectivos para reducir la temperatura del aire exterior y mitigar el efecto de ICU, con una reducción de hasta 1.5 °C en los meses más cálidos [11]. Así mismo, las morfologías urbanas en Hong Kong se utilizaron en un modelo de simulación (ENVI-met) para examinar tres indicadores de enfriamiento: intensidad de enfriamiento (CI), área de enfriamiento (CA) y duración de enfriamiento (CD), evaluando la eficiencia térmica de las estrategias de IG en un enfoque espacio-temporal, lo que puede ayudar a los planificadores urbanos a seleccionar las mejores estrategias para mitigar el calor urbano [12]. De igual manera, estudios realizados en Nanjing, China se busca mejorar la conectividad de los espacios verdes urbanos para optimizar su capacidad de enfriamiento, el modelo sugiere la creación de áreas de fuente de enfriamiento (CSA) y una red de enfriamiento que conecte estos espacios, lo que ayudaría a prevenir la fragmentación y mejorar la efectividad del enfriamiento urbano [13]. Así mismo, en el área metropolitana de Toronto, Canadá se espera días calurosos con temperaturas superiores a los 30°C y un aumento significativo en las próximas décadas, lo que podría tener graves impactos en la salud, particularmente en poblaciones vulnerables, como personas mayores o aquellas con afecciones cardiorrespiratorias, proponiendose estudios en un marco integrado para evaluar los beneficios del aumento de la vegetación urbana, no solo desde una perspectiva ambiental, sino también económica y de salud pública [14]. Así mismo, en la ciudad de Nagpur, India, se viene utilizando datos satelitales de Landsat (TM y ETM+) para los años 2000, 2005, 2010 y 2015, mostrando un aumento gradual de 38,8 °C en 2000 a 39,9 °C en 2015, la vegetación y los cuerpos de agua mostraron una capacidad significativa para mitigar la ICU, mientras que las áreas con suelos desnudos y vegetación escasa presentaron las temperaturas más altas [15]. Además, las zonas urbanas abiertas tienden a tener temperaturas más suaves durante el día, especialmente en áreas con edificios más altos, mientras que las áreas compactas de baja altura exhiben la mayor intensidad de ICU y por la noche, los edificios altos generan temperaturas más altas, mientras que las áreas abiertas y de baja altura experimentan temperaturas más suaves, confirmando que la estructura urbana y la presencia de vegetación son factores clave que influyen en la dinámica de las ICU [16]. Por otro lado, una propuesta es el uso de tecnologías de pavimento frío, que buscan reducir la temperatura de las superficies pavimentadas aumentando la reflectancia solar o incorporar materiales evaporativos [17]. En conclusión, la infraestructura verde, junto con tecnologías innovadoras y planificación urbana estratégica, es fundamental para enfrentar los desafíos climáticos y urbanos. Sin embargo, la fragmentación de los espacios verdes y los pocos estudios limitan la sostenibilidad urbana. Por tal motivo el presente estudio de revisión de metodologías de mitigación de ICU en diversas ciudades en los últimos cinco años desde el 2020 al 2024 en búsqueda de las propuestas más efectivas para brindar una solución a la problemática de las ICU.

II. METODOLOGÍA

Los artículos consultados en esta revisión provienen de las bases de datos electrónicas ScienceDirect, Google Scholar y Scopus. La búsqueda se limitó solo en artículos originales, congresos indexados en cualquier idioma y publicados en los últimos cinco años del 2020 al 2024, seguido de una búsqueda manual adicional de las referencias de los artículos recuperados, utilizando las palabras clave "Green Infrastructure", "mitigation strategies", "local climate zones", "land surface temperature" y "urban heat islands", se utilizaron los operadores booleanos "OR'' y "AND" para aumentar el número de variaciones del término de búsqueda, obteniendo un total de 410, 399 y 507 artículos científicos respectivamente.

A. Criterio de selección

Los artículos científicos obtenidos luego de realizar la búsqueda en cada base de datos electrónicas se exportaron a un libro de Excel Microsoft 365 para el tratamiento de selección, exclusión de duplicados y clasificación. En la selección de títulos y resúmenes científicos se realizó manualmente para seleccionar los artículos relevantes y posteriormente se evaluó mediante selección de texto completo. En esta revisión sólo se incluyeron artículos originales publicados en revistas de revisión por pares y que

contienen datos sobre la mitigación de islas de calor urbanas evaluadas por diferentes especialistas utilizando principalmente la aplicación de modelos de simulación como ENVI-met, y en el uso de datos satelitales de alta resolución (Gaofen-1, Sentinel-2, MODIS y Landsat) para evaluar la temperatura superficial (LST) en diversas ciudades. La presente revisión incluye estudios centrados en la evaluación de la infraestructura verde en la mitigación de la ICU, ciudades subtropicales y urbanas de clima cálido, mediante simulaciones y evaluación de escenarios por computadora, como se aprecia en la TABLA 1.

TABLA 1
CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN

Criterios de Inclusión (CI)	
CI 1	Los estudios incluidos deben abordar el tema de elaboración de Islas de Calor Urbana (ICU).
CI 2	Los estudios deben aplicar y/o describir las metodologías de mitigación de las ICU evaluadas.
CI 3	Los estudios incluidos deben reportar resultados estadísticos sobre la aplicación de estrategias de mitigación.
Criterios de Exclusión (CE)	
CE 1	Los estudios no incluyen metodologías de mitigación de las ICU.
CE 2	Los estudios no describen las metodologías de mitigación de las ICU.
CE 3	Artículos anteriores al año 2020.

Elaboración propia

B. Extracción y análisis de datos

Los autores de la presente revisión realizaron la recopilación de información de los artículos científicos en cada estudio seleccionado, recopilando la siguiente información para su inclusión: densidad poblacional, variación de temperatura urbana y rural, métodos de mitigación de calor, materiales urbanos refractarios, implementación de puntos verdes, simulaciones por computadora y cuantificación de variaciones de temperatura. Estos datos se recuperaron directamente del texto completo, se convirtieron a las mismas unidades o en algunos casos, se infirieron del análisis gráfico.

Los datos extraídos de los artículos científicos y actas de congresos se condensaron en una tabla de Excel y se resumieron mediante estadística descriptiva, utilizando gráficos y tablas de frecuencia para variables cualitativas y cuantitativas.

III. RESULTADOS

A. Características de estudios incluidos

La búsqueda en línea recuperó 1316 estudios. Después de la eliminación de duplicados y clasificación en un libro de Excel, quedaron 349 artículos para el análisis. Según la selección de títulos y resúmenes, se eliminaron 219 estudios porque no cumplían con los criterios de inclusión, dejando 130 para la selección de texto completo. De ellos, 15 estudios evalúan las variaciones de temperaturas en zonas urbanas y la cuantificación de métodos que logran mitigar las ICU, el esquema de identificación y selección de estudios vía base de datos se aprecia en la Fig. 1.

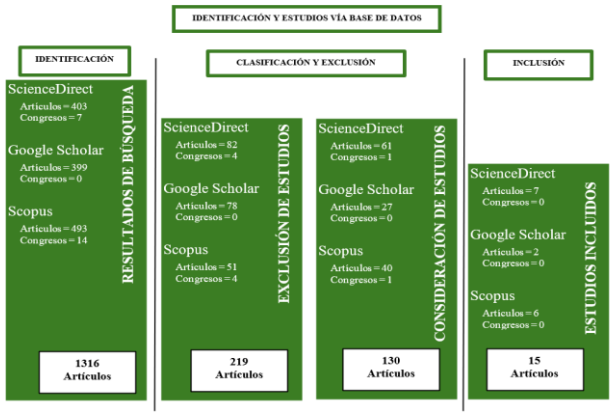


Fig. 1. Esquema de identificación de estudios vía base de datos. (Elaboración propia)

B. Evaluación de estudios

En los estudios evaluados para la revisión sistemática de la mitigación de las ICU mediante la IG, los resultados de los estudios de investigación demuestran las diferentes técnicas de aplicación.

TABLA 2
ESTUDIOS DE EVALUACIÓN DE LAS ISLAS DE CALOR URBANO EN DISTINTAS CIUDADES REALIZADOS ENTRE LOS AÑOS 2020 AL 2024

Nombre de Artículo	Año	País	Fuente
Impact of urban spatial dynamics and blue-green infrastructure on urban heat islands: A case study of Guangzhou using Local Climate Zones and predictive modeling	2024	China	[18]
Street-level urban heat island mitigation: Assessing the cooling effect of green infrastructure using urban IoT sensor big data	2024	USA	[19]
Planning for cooler cities in Ghana: Contribution of green infrastructure to urban heat mitigation in Kumasi Metropolis	2023	Ghana	[20]
Spatiotemporal distribution of cooling effects from urban-scale rooftop mitigation strategies during high-temperature weather—A case study of the coastal Metropolis Tokyo	2024	Japón	[21]
How to quantify the cooling effects of green infrastructure strategies from a spatio-temporal perspective: Experience from a parametric study	2023	China	[22]
Health-informed predictive regression for statistical-simulation decision-making in urban heat mitigation	2023	Canadá	[23]
A transferable approach to assessing green infrastructure types (GITs) and their effects on surface urban heat islands with multi-source geospatial data	2024	China	[24]
The effectiveness of urban green infrastructure in reducing surface urban heat island	2022	Irak	[25]
Evaluating urban heat island mitigation strategies for a subtropical city centre (a case study in Osaka, Japan)	2022	Reino Unido	[26]
Efficiency assessment for the urban heat island mitigation measures in a city with an oceanic climate during the summer period: Case of Valdivia, Chile	2024	Chile	[27]
Development and evaluation of STRC coating for cooling asphalt pavement and mitigating urban heat island effects	2024	China	[28]

Nombre de Artículo	Año	País	Fuente
"Investigating and mapping day-night urban heat island and its driving factors using Sentinel/MODIS data and Google Earth Engine. Case study: Greater Cairo, Egypt"	2023	Egipto	[29]
Toward park design optimization to mitigate the urban heat Island: Assessment of the cooling effect in five U.S. cities	2022	USA	[30]
Tree species richness and diversity predicts the magnitude of urban heat island mitigation effects of greenspaces	2021	China	[31]
Urban heat island mitigation in Singapore: Evaluation using WRF/multilayer urban canopy model and local climate zones	2020	Singapur	[32]

Elaboración propia

De los estudios incluidos en la evaluación de metodologías para la mitigación de ICU, los estudios realizados por investigadores en China representan el 46.67% del universo del total de estudios [18,20,22,24,28,30,32], lo cual refleja la importancia de los investigadores asiáticos en brindar soluciones basadas en infraestructura verde evaluando soluciones debido a la densidad poblacional de las ciudades estudiadas y su potencial de crecimiento urbano. Por otro lado, en el año 2024 se desarrolla el 40% los estudios de mitigación de las ICU incluidos en la presente revisión como se encuentran identificados en la TABLA 1 [18,19,21,24,27,28], lo cual refleja un mayor número de estudios en los últimos años por distintos investigadores del mundo en diferentes ciudades de varios continentes, aplicando técnicas de infraestructura verde, toma de datos satelitales y simulaciones por computadora. Así mismo, en los países de Latinoamérica como es el caso de Chile se vienen abordando esta problemática, en la ciudad de Valdivia [27].

C. Evaluación de la infraestructura refractante, áreas verdes y azules

Se seleccionaron investigaciones donde se utilizaron técnicas para evaluar el impacto de la infraestructura verde (albedo, techo verde, pavimentos fríos y vegetación), los estudios incluidos para el análisis se encuentran en la TABLA 3, analizando estudios de ciudades que enfrentan retos de adaptación al cambio climático y mitigación de las ICU.

TABLA 3
ESTUDIOS DONDE SE EVALÚAN INFRAESTRUCTURA REFRACTANTE, ÁREAS VERDES Y AZULES.

Fuente	Evaluación	Modelos	Adquisición de data	Área de impacto	Tiempo de estudios	Descripción
[20]	Espacios verdes urbanos (Imágenes satelitales)	MOLUSCE y CA-ANN-	Imágenes Landsat, ArcGIS 10.8, ENVI 5.0 y 5.3	La metrópolis de Kumasi se encuentra a 270 km al norte de la capital de Ghana.	Período analizado entre los años 1980 a 2020, con predicciones para los años 2030, 2040 y 2050	La temperatura media para el período de estudio varía entre 31,62 °C y 20,79 °C. Entre 2010 y 2020, hubo un aumento considerable (de 3,1 °C en las temperaturas máximas) en el calor urbano, que podría atribuirse a la alarmante tasa de degradación de los bosques y la tierra (tasa de disminución del 2,3% entre 1980-2020). La distribución muestra que la superficie construida con infraestructura tradicional (concreto) aumentará a una tasa del 14,82%, las tierras de cultivo y los arbustos disminuirán a una tasa del 75,11%, las áreas cubiertas por cuerpos de agua disminuirán en un 47,22%, la tierra desnuda se expandirá en un 80,14%, mientras que los bosques durante el período de estudio (2020 al 2050) disminuirán en un 73,64%.
[24]	Espacios de infraestructura verde (Imágenes satelitales)	Esquema de clasificación de infraestructura verde (GI) multinivel	Satelitales SDGSAT-1, Sentinel-2, Gaofen-1 y datos geoespaciales	Se centró en la ciudad de Pekín, China	Período de verano de junio a agosto de 2020.	Las LST estimadas oscilaron entre 40.2 °C en áreas altamente impermeables y temperaturas más bajas de 33.6 °C en áreas con infraestructura verde y cuerpos de agua. El estudio mostró que las IG acuáticos exhibieron temperaturas superficiales entre 4,2 y 7,6 °C más bajas que las superficies impermeables en el núcleo urbano, sin embargo, el crecimiento urbano no planificado genera ICU. La IG puede ser adaptado para otras ciudades con ajustes climáticos y de vegetación local. La implementación del método en diversas regiones ayudará a mejorar estrategias urbanas de mitigación de ICU.
[28]	Revestimiento frío, STRC5 en el hormigón asfáltico	Pruebas en laboratorio y aplicativo en hormigón	Pruebas térmicas personalizadas, análisis espectroscópicos y microscópicos.	El estudio se centra en el desarrollo y evaluación de un recubrimiento reflectante térmico solar (STRC)	Se llevo a cabo en un período que abarcó desde el 1 de julio de 2024 hasta el 23 de septiembre de 2024	En el estudio muestra que la columna de hormigón asfáltico con el revestimiento STRC5, por ejemplo, en t = 1 h, la temperatura media de la muestra sin revestimiento es de 48,70 °C, mientras que la muestra revestida es significativamente más fría a 40,49 °C. De manera similar, en t = 2,5 h, la temperatura media de la muestra sin revestimiento es de 57,73 °C, mientras que la muestra revestida permanece más fría a 47,68 °C y la aplicación de STRC5 sobre hormigón asfáltico produjo efectos de enfriamiento significativos, con una diferencia máxima de temperatura de 10,56 °C entre las muestras recubiertas y no recubiertas después de 4 h de exposición a la luz. Los ensayos de campo a gran escala para evaluar la eficacia del revestimiento en diversas condiciones climáticas, cargas de tráfico y escenarios de mantenimiento. Así mismo, sería beneficioso investigar exhaustivamente la durabilidad a largo plazo y la resistencia a la intemperie de STRC5 para garantizar su rendimiento sostenido durante la vida útil del pavimento. El STRC5 tiene un gran potencial para reducir eficazmente las temperaturas de los pavimentos de asfalto y mitigar los efectos de ICU, mejorando el confort térmico urbano y contribuyendo a un entorno más sostenible.

Fuente	Evaluación	Modelos	Adquisición de data	Área de impacto	Tiempo de estudios	Descripción
[29]	Imágenes satelitales de áreas urbanas	SAR y el algoritmo RF	Sentinel/MODIS y Google Earth Engine	La región de investigación incluye Gran Cairo, y sus alrededores rurales	Abril de 2021 hasta marzo de 2022	Los resultados estimaron que, durante el día, la LST fluctuó de 301,64 K a 311,33 K. Mientras que la LST derivada durante la noche estuvo entre 289,67 K y 295,46 K. Entre todas las variables clave, el nivel de contaminación fue el mejor factor de influencia en la intensidad de la ICU diurno debido a mayores actividades antropogénicas y emisiones de transporte durante el día en la megaciudad. Al mismo tiempo, por la noche, la insolación difusa fue el factor clave que afectó la intensidad de la ICU en la región de investigación. Además, NDVI, PV, NDBI, velocidad del viento y altitud fueron factores significativos que fueron importantes tanto durante el día como por la noche. El estudio ofrece datos sobre la huella urbana en la megaciudad Gran Cairo, demostrando que las áreas urbanas representaban aproximadamente el 44,4% del área total de la investigación, además, la precisión general y el coeficiente Kappa de extracción de data urbana fueron del 91,5% y 0,82, respectivamente, validando el modelo de red neuronal ofreciendo el aumento de áreas verde, ello ofrece ventajas sobre la capacidad de analizar relaciones complejas y no lineales entre variables.
[30]	Imágenes satelitales de área de parques	El modelo gaussiano se utilizó para parametrizar el efecto de enfriamiento del parque.	Google Earth	Cinco ciudades de EE. UU.: Baltimore; Chicago, Austin, Los Ángeles y Portland	En el año 2015.	Portland exhibió valores de intensidad de enfriamiento de parque (PCI) relativamente altos (media: 6,89 K), Austin obtuvo un PCI bajo (2,93 K). Las otras tres ciudades (Baltimore, Chicago y Los Ángeles) tuvieron valores intermedios de PCI (3,44, 3,72 y 4,73 K, respectivamente). La dinámica diurna del efecto de enfriamiento del parque debe explorarse más a fondo para comprender integralmente los comportamientos térmicos en diferentes momentos del día. Además, la influencia de los factores en el efecto de enfriamiento del parque varía entre las ciudades de EE. UU. El diseño futuro de parques urbanos se presenta como alternativa para mitigar el ICU y mejorar el confort térmico, pudiendo utilizar el método para explorar el rendimiento de enfriamiento de parques.
[31]	Imágenes satelitales de área de arboles	El índice de diversidad de Shannon-Wiener	Imágenes Landsat (Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 TIRS7)	Ciudad de Changzhou, provincia de Jiangsu, China	Años 2017-2018 (junio de 2017 y febrero de 2018).	El rango de enfriamiento aumenta 65,4 metros por cada aumento de 1 metro en el ancho medio de la copa, en otoño 21% de la variación. El rango de enfriamiento aumenta en 41,8 metros por cada aumento de 1 metro en el ancho medio de la copa, en invierno 6% de la varianza y el rango de enfriamiento disminuye en 1,3 metros por cada aumento de 10 árboles por hectárea. Se debe considerar la cobertura del dosel, el ancho del dosel y la densidad sean prioritarios cuando se trata de diseñar espacios verdes para maximizar su papel de mitigación. Aumentar la cobertura del dosel arbóreo resulta en un mayor efecto de enfriamiento, al igual que asegurar que las copas de los árboles sean anchas. En términos de estructura de la comunidad vegetal, los árboles con las copas más anchas generarán más sombra y potencialmente más evapotranspiración en verano y otoño, demostrando que, cuando la cobertura arbórea se mantiene constante, así como la diversidad dentro de los espacios verdes, puede tener un efecto significativo en la magnitud del efecto refrescante durante las estaciones.

Elaboración propia

El estudio en el área Metropolitana de Kumasi, Ghana analiza los cambios en la cobertura y uso del suelo (LUCC) y su relación con las ICU en el período de 1980 a 2020, las áreas edificadas aumentaron significativamente (+108,02%), mientras que los bosques (-93,34%) y las tierras agrícolas/arbustos (-31,53%) disminuyeron drásticamente, en consecuencia la pérdida de vegetación y cuerpos de agua contribuyó a la degradación ambiental de Kumasi, conocida previamente como la "Ciudad Jardín de África Occidental" [20]. Así mismo, en la ciudad de Pekín la IG juega un papel crucial en la mitigación de las islas de calor urbanas superficiales (SUHI) y en el fortalecimiento de la resiliencia urbana al cambio climático, lo que contribuye a alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible en las áreas urbanas [24]. Por otro lado, se desarrolló y evaluó STRC, con el objetivo de mitigar los impactos negativos de las ICU, específicamente para reducir las temperaturas del pavimento de asfalto, evaluando el rendimiento de ocho formulaciones de STRC utilizando pruebas térmicas personalizadas, análisis espectroscópicos y microscópicos, entre las formulaciones probadas, el STRC5 demostró el mejor rendimiento, con una alta reflectancia en la banda del infrarrojo cercano (71,85 %) y una reflectancia visible de 35,69 %, lo que proporciona una regulación térmica eficiente sin causar deslumbramiento [28]. También, se estudió la intensidad anual y estacional de las ICU, así como sus factores impulsores, en el Gran Cairo (GC), utilizando datos satelitales avanzados de diversas fuentes entre abril de 2021 y marzo de 2022. Los datos del radar Sentinel-1 y las imágenes térmicas Sentinel-3 se utilizaron para mapear la huella urbana y extraer las temperaturas de la superficie terrestre (LST) diurnas y nocturnas, analizando las concentraciones de contaminantes como NO_2, SO_2, CO y aerosoles, utilizando el instrumento TROPOMI [29].

Así también, se estudiaron 384 parques urbanos de cinco ciudades de Estados Unidos, destacando la importancia que juegan los parques urbanos en mitigar el efecto de ICU al enfriar el ambiente urbano, evaluándose mediante un modelo gaussiano modificado con tres índices de enfriamiento de los parques: intensidad de enfriamiento (PCI), distancia de enfriamiento (PCD) y eficiencia de enfriamiento (PCE), basándose en la evapotranspiración de la superficie, afectando el potencial de enfriamiento de los parques en Austin y Los Ángeles, además, desarrollaron un modelo de bosque aleatorio demostrando sensibilidades en las variables de área y

evapotranspiración, maximizando los beneficios del enfriamiento de los parques [30]. Igualmente, en Changzhou, China, se evaluó cómo la estructura de la comunidad de árboles influye en su capacidad de enfriamiento, evaluando dos métricas: amplitud de caída de temperatura (TDA) y rango de enfriamiento (CR), encontrándose diversidad de especies arbóreas, medidas por el índice de Shannon-Wiener, riqueza de especies y cobertura del dosel, mejorando la eficacia del enfriamiento, particularmente en primavera, verano y otoño, además, el ancho del dosel influye en el rango de enfriamiento en verano y otoño, mientras que la densidad de árboles tiene un impacto negativo en invierno [31]. Por tanto, la inserción de áreas verdes es crucial para el diseño de ciudades más sostenibles y resilientes; del mismo modo, el análisis de los índices de enfriamiento son factores claves para el bienestar urbano.

En un estudio realizado en Pekín, se clasificaron los Tipos de IG permitiendo diferenciar de manera efectiva el efecto de enfriamiento de diversos tipos de IG en el núcleo urbano de Beijing, el método integra datos multiespectrales y multifuentes con precisión general del 84.7% y un coeficiente kappa de 0.815, determinando que la vegetación, incluidos árboles, arbustos y pastos, puede mitigar las ICU, entre ellas las IG acuáticas con una fracción de agua mayor a 50% proporcionaron los efectos de enfriamiento más fuertes (5,3 a 7,6 °C) y las IG permeables con >75% de superficie permeable pueden proporcionar una disminución de LST que varía de 3,2 a 5,6 °C, además, los árboles de hoja perenne y de hoja caduca densa (5,4 a 5,6 °C) se encontraban entre los más eficaces para mitigar las ICU [24]. Por otro lado, el revestimiento en frío de STRC5 demostró una alta eficiencia en la reducción de la temperatura, con un reflejo visible de 35.69% y un reflejo en el infrarrojo cercano de 71.85%, mostrando estabilidad y durabilidad frente a inmersión en agua y variaciones extremas de temperatura [28]. Así mismo, en el Gran Cairo mediante imágenes satelitales, reporta que la acumulación de gases de efecto invernadero como NO_2, SO_2, CO y AOD, teniendo una relación de dispersión causada por la alta velocidad del viento, ello afecta la difusión del calor y en consecuencia el confort en la megaciudad [29]. Así mismo, en el estudio de imágenes de satelitales de área de árboles, se estudió 2082 árboles que fueron muestreados, 1253 (60,2%) eran caducifolios y el resto perennes en la Ciudad de Changzhou, provincia de Jiangsu, China, resultando que la estructura de la comunidad de árboles con las copas más anchas generará más sombra y potencialmente más evapotranspiración en verano y otoño [31].

La evaluación de las ICU en diversas regiones del mundo destaca la necesidad de mitigar sus efectos negativos mediante enfoques multifacéticos que combinan IG, innovaciones tecnológicas y planificación urbana estratégica, reflejando las interrelaciones complejas entre el uso del suelo, los patrones climáticos y las soluciones de mitigación. Así mismo, los estudios demuestran que la combinación de IG bien planificada, innovaciones tecnológicas y estrategias de monitoreo ambiental, como el uso de imágenes satelitales y modelos avanzados, puede mitigar eficazmente las ICU. Sin embargo, las soluciones deben adaptarse al contexto local de cada urbe, considerando factores como la estructura urbana, los patrones climáticos y la disponibilidad de recursos naturales. La integración de estas estrategias en las políticas urbanas es fundamental frente al cambio climático y la creciente urbanización de las ciudades alrededor del mundo.

D. Simulaciones y evaluación de escenarios por computadoras

Se incluyeron estudios que utilizaron simulaciones por computadora para evaluar el impacto de diferentes escenarios de IG en la reducción de la temperatura superficial (temperatura del aire exterior, radiación neta, potencia radiactiva térmica y temperatura radiante media), ellos se encuentran identificados en la TABLA 3, por los criterios de evaluación, modelos, adquisición de data, área de estudio, tiempo de estudio y comentarios.

TABLA 4
ESTUDIOS INCLUIDOS DONDE SE DESARROLLARON SIMULACIONES POR COMPUTADORA ENTRE LOS AÑOS 2020 A 2024

Fuente	Modelos	Adquisición de data	Área de impacto	Tiempo de estudios	Descripción
[18]	InVEST, CA-Markov	Se usaron imágenes satelitales, datos climáticos y modelos para analizar patrones de uso del suelo y mitigación del calor.	Guangzhou, China ubicada en la zona climática subtropical oceánica monzónica,	Datos adquiridos de los años 2013 a 2019.	El estudio aborda el impacto de la infraestructura verde-azul (BGI) y la dinámica espacial urbana sobre las ICU en Guangzhou, cuya temperatura ambiente es 21,99 °C para diferentes zonas, los edificios compactos de baja altura muestran la intensidad más alta, alcanzando 1,19 °C, que superó a los edificios compactos de mediana y gran altura en un 35%, causado por la expansión urbana descontrolada que aumento la isla de calor y disminuye la eficiencia energética. Para el año 2025 se espera que las áreas urbanizadas densas sean principalmente las zonas de ICU, ante esto se propone mitigar el incremento de temperaturas y maximizar los beneficios energéticos y climáticos en función de la BGI.
[19]	COMFA, SLM, SEM	Se utilizaron sensores IoT y datos climáticos a nivel de calle en verano para modelar la variación de las ICU.	Seúl en Corea del Sur, Según la clasificación climática de Köppen, Seúl tiene un clima continental húmedo	los datos se recopilaron entre junio y agosto de 2020, especialmente en verano, Seúl, Corea del Sur, debido a su alta densidad urbana.	Se identificaron áreas críticas de calor y mitigación mediante proporción de proximidad a edificaciones verde-azul y vegetación. La temperatura ambiente promedio fue de 27,21 °C. registrándose 47,50 °C durante el día y 37,90 °C por la noche. Así mismo, la rápida urbanización y densificación de Seúl intensifica las ICU, afectando la salud y el confort térmico, sin embargo, el incrementar las edificaciones verdes podría mitigar levemente las ICU y mejorar la temperatura del ambiente urbano.

Fuente	Modelos	Adquisición de data	Área de impacto	Tiempo de estudios	Descripción
[21]	WRF	Se utilizó el modelo WRF acoplado con un modelo de dosel urbano y simulaciones de días de calor extremo.	23 distritos especiales en Tokio, Japón.	Días soleados con altas temperaturas seleccionados entre los años 2018 y 2022.	En el estudio se observa que los techos verdes y paneles fotovoltaicos disminuyen las temperaturas diurnas, en los días de alta temperatura, ello representa aproximadamente un aumento del 30% de los valores medios de 16 días (es decir, con una Ta de fondo de aproximadamente 36 °C, Δ Ta medio de 23 barrios de −0,09 °C y − 0,11 °C). En consecuencia, las altas temperaturas en Tokio aumentan el riesgo de la sobrecarga de los circuitos urbanos de energía, para mitigar estos efectos de calor la adaptación de techos verdes y fotovoltaicos muestran eficiencia en mitigar el calor extremo y mejorar el rendimiento energético.
[22]	ENVI-met	El estudio se realizó mediante simulaciones paramétricas usando el modelo ENVI-met, para un día típico de verano en Hong Kong.	El estudio se centra en Hong Kong, una ciudad representativa de climas subtropicales húmedos.	Se recopiló información durante días típicos de verano.	Las temperaturas simuladas en el estudio varían entre 28.48 °C y 33.15 °C en función de estas temperaturas se planteó las estrategias de IG evaluadas (como techos verdes, muros verdes y árboles urbanos) mostraron una reducción promedio en la temperatura del aire entre 0.01 °C y -3.34 °C, la eficiencia depende de la estrategia y morfología urbana.
[23]	UWG	Simulaciones del clima con el modelo UWG (Urban Weather Generator) y análisis de regresión	York, sur de Ontario, Canadá.	Entre 2003 y 2019, se analizó los registros de salud relacionados con el calor y las principales condiciones ambientales en temporadas cálidas	El estudio desarrolla una comparación de escenarios con estrés térmico y temperatura con mayor vegetación, durante eventos de calor extremo, las temperaturas máximas alcanzaron 39 °C, las simulaciones con escenarios de mayor cobertura verde (intensa) mostraron reducciones de la temperatura máxima diaria de hasta 6.9 °C. En consecuencia, el aumento de las ICU, su impacto en la salud pública y consumo de energía, están ligados en la disminución de 4.8 °C en temperaturas extremas y del 29.2% en sistemas de consumo de energía.
[25]	ENVI-met	Simulaciones climáticas con ENVI-met teniendo como condiciones iniciales diversos escenarios de infraestructura verde.	Municipalidad de Risafa, ubicada en el centro de Bagdad, Iraq, caracterizada por altos niveles de intensidad de isla de calor urbano.	La simulación climática se centró en el 21 de julio de 2020, identificado como el día con la temperatura más alta registrada en Bagdad ese año.	En el estudio se evaluó el impacto de diferentes estrategias verdes en la mitigación de temperaturas (4 - 22 °C), la temperatura mínima y máxima fueron 22.91 °C y 48.4 °C, respectivamente. Así mismo, la implementación de IG con temperaturas máximas, disminuyeron hasta 40.78 °C, logrando una reducción máxima de 8 °C en algunos puntos, estas altas temperaturas se deben a la urbanización descontrolada, sin embargo, la combinación de estrategias de IG puede extenderse a otras áreas urbanas con condiciones similares, optimizando el diseño para superficies específicas.
[26]	ENVI-met	Se utilizaron simulaciones en ENVI-met.	El estudio se centra en Osaka, Japón, específicamente en el distrito Chuo y sus alrededores.	La simulación analizó un día típico de verano (5 de agosto de 2019) y un día de invierno (10 de febrero de 2019), cada uno con un período de simulación de 24 horas.	El estudio evaluó estrategias como; pavimentos frescos, techos reflectantes y vegetación, en el escenario de verano se presentó temperatura inicial de 32 °C con una temperatura máxima de 35.46 °C, cuya mayor reducción es de 33.24 °C. Por otro lado, en el escenario de invierno la temperatura inicial de 5 °C y máxima de 15.21 °C, cuya mayor reducción: 13.09 °C. Concluyéndose que incrementar el albedo de los materiales urbanos y expandir la cobertura vegetal son estrategias viables para mitigar la ICU.
[27]	ENVI-met , software CFD	Se utilizaron modelos en ENVI-met para generar distintas estrategias de mitigación en un día típico de verano.	Se centra en la ciudad de Valdivia, Chile, una ciudad de tamaño medio con un clima oceánico.	En verano del 2021, específicamente el 5 de diciembre, con condiciones de cielo despejado	El estudio evalúa diferentes parámetros que incluyen cobertura arbórea, pavimentos reflectantes y fuentes de agua. La temperatura osciló entre 12 °C a las 05:00 horas y 28 °C a las 15:00 horas, requiriendo contar con estrategias para solucionar la adaptación local por la afectación de microclima urbano, las estrategias de mitigación pueden ayudar a reducir la intensidad de las ICU en Valdivia y en otras ciudades con características climáticas similares.
[32]	WRF 3.8.1., LSM, BEP/BEM circundante.	Datos de análisis final cada 6 horas del Sistema Global de Asimilación de Datos (GDAS).	Singapur es un estado insular situado justo al norte del ecuador, entre 1°09′ N y 1°29′ N, y 103°36′ E y 104°25′ E.	1 de Abril 00 UTC @ 30 de Abril 00 UTC del 2016, abril de 2016 es un período muy caluroso, con una temperatura máxima récord de 36,4 °C	Se evaluaron las estrategias como techos fríos y ajustes de termostatos para efectos del calentamiento urbano, donde el techo frío utilizó valores de albedo de 0,4, 0,6 y 0,86. Para el valor de 0,86 se seleccionó del revestimiento SOLARFLECT 1 de EPA Energy Star para evaluar un caso extremo de material de alto albedo. Concluyendo que el crecimiento urbano y el aumento de densificación intensifican el efecto de ICU. Proyectándose para el 2030, la población total de Singapur podría oscilar entre 6,5 y 6,9 millones y dar cabida al aumento de la densidad de población de aproximadamente 7841 personas/km2 en 2016 a 9040–9600 personas/km2 para el 2030.

Elaboración propia

El estudio realizado por la Ref. [18], se desarrolló en Guangzhou, proyectando escenarios para el periodo 2025 con simulaciones del modelo inVEST que se basó en 3 determinantes esenciales: la sombra proporcionada por los árboles, la evapotranspiración urbana y el albedo de la superficie urbana, analizando el impacto de la dinámica espacial urbana y la infraestructura verde-azul, sobre el efecto de ICU, el cual generó el escenario de "Protección Ambiental", que mostró una mejora del 21.2% en el aumento de mitigación de calor y 6.6% un ahorro energético en comparación al escenario de urbanización estándar.

Por otro lado, en Seúl se evaluó cómo la infraestructura verde y los cuerpos de agua ayudan a mitigar las ICU en términos de Confort Térmico Exterior, utilizando datos a nivel de calle durante los meses de verano, para ello se analizaron los sensores IoT urbanos y se utilizaron herramientas como modelos de regresión espacial, esto permitió evaluar el impacto del diseño urbano y la densidad sobre las ICU, logrando identificar áreas de alta variación de temperaturas (frías o cálidas), destacando las áreas con mayor vegetación, la cual mitigó el aumento de calor en las ICU [19]. Así mismo, otro estudio evaluó estrategias de mitigación en techos para contrarrestar las altas temperaturas y el efecto de ICU, utilizando el modelo Weather Research and Forecasting (WRF) acoplado con un modelo de dosel urbano (UCM), reportando finalmente, que los techos verdes con pasto dieron como resultado un mayor efecto de enfriamiento diurno a nivel peatonal (0.13 °C) en diferencia con los techos verdes con sedum (0.11 °C) y paneles fotovoltaicos (0.10 °C), ello muestra que al aumentar el estrés térmico da como resultado

una mayor evaporación en los techos verdes, donde afecta en un 75% del área de estudio respecto a la temperatura global del bulbo húmedo [21].

De igual manera, en Hong Kong se evaluaron las estrategias de mitigación del efecto de ICU utilizando el modelo ENVI-met, analizando siete estrategias de infraestructura verde, entre ellas se analizó la eficacia de estas estrategias bajo distintas configuraciones urbanas, concluyendo, en que los árboles urbanos demostraron el mayor impacto, con una reducción diurna de hasta 1,41 °C en la temperatura del aire (AT), 16,49 °C en la temperatura radiante media (MRT) y 9,03 °C en la temperatura fisiológicamente equivalente (PET). Las estrategias fueron más efectivas en calles con un factor de cielo despejado (0,7) [22].También, se desarrolló un estudio en York, Ontario, donde se examinó el efecto de aumentar la cobertura vegetal como táctica para aliviar las temperaturas intensas y ICU, empleando modelos de microclima con Urban Weather Generator (UWG) y junto con regresión de Poisson, analizando el aumento de la vegetación(árboles y arbustos) y cómo influye en la temperatura ambiente, el consumo de energía de los edificios y el estrés térmico del exterior, encontrando que una robusta situación de crecimiento vegetal disminuye el calor máximo diario en 4,8 °C durante las olas de calor severas, bajando el índice de estrés por humedad en un 14,8% y disminuyendo el uso de energía en un 29,2%, además, ello genera beneficios económicos significativos al reducir los costos de salud y el consumo de energía [23].

Un estudio reportado en la Ref. [25] en Bagdad, municipalidad de Risafa, evaluó cómo la IG puede reducir la intensidad de las SUHI, utilizando el modelo de simulación ENVI-met, analizando cuatro escenarios: caso base, elementos más fríos, superficies verdes y la transformación de lugares grises en parques, proponiendo iniciativas verdes discretas, disminuyeron el calor superficial entre 4 y 22 °C. Dependiendo del tipo de intervención y las condiciones originales de la superficie, las estrategia de los árboles más grandes y la cobertura vegetal densa son más eficaces para enfriar las ciudades con edificios apretados entre las propuestas del estudio.

Así también, se evaluó estrategias para mitigar las ICU en Osaka, Japón, utilizando el software ENVI-met para modelar escenarios específicos como; calles recién pavimentadas, techos reflectantes y aumento de vegetación, de ellos se analizaron parámetros como temperatura del aire, factor de cubierta nubosa y radiación neta, identificando que los pavimentos frescos que presenta mayor albedo (refleja mayor radiación de onda corta y larga) son la estrategia más eficiente para reducir temperaturas tanto en verano como en invierno [26]. Así mismo, en Valdivia, Chile también se evaluaron estrategias para mitigar las ICU utilizando simulaciones en el software ENVI-met durante la temporada de verano en la cual se consideraron cuatro estrategias que fueron: cobertura arbórea, pavimentos reflectantes, fuentes de agua y una estrategia combinada, resultando que los pavimentos reflectantes con un albedo de 0,8 fueron los más efectivos, también reduciendo hasta 0,94 °C la intensidad de las ICU, mientras que las fuentes de agua mostraron impactos localizados y temporales, logrando una reducción de hasta 1,4 °C con la estrategia combinada que fueron las más eficientes y la cobertura vegetal incrementada al 17% obtiene una reducción 0,6 °C las temperaturas urbanas [27]. Por otro lado, la mitigación de ICU en Singapur evaluó diferentes estrategias mediante el modelo WRF/multilayer urban canopy y zonas climáticas locales, se enfocó el estudio en abril de 2016, ello mostro que la implementación de techos fríos aumentando el albedo (0.2 a 0.86), disminuyo la temperatura diurna en 1.3 °C en zonas de baja densidad, respectó a sectores que se mostraron más afectados, el índice de calor mejoro en 2 a 2.5 °C y al elevar el termostato de aire acondicionado a 25 °C, se disminuyó el flujo de calor antropogénico (20.6%), mitigando el efecto nocturno de isla de calor en 0.2 a 0.4 °C [32].

En conclusión, las estrategias de mitigación como; pavimentos reflectantes y techos fríos, junto con la vegetación y fuentes de agua, demuestran ser altamente efectivas para mitigar las ICU, mejorando el confort climático.

La mitigación del efecto de las ICU, según los modelos simulados depende de enfoques integrados que combinen infraestructura verde-azul, diseño urbano adaptativo y tecnologías avanzadas, mostrando que la vegetación densa y los árboles urbanos son consistentemente eficaces para reducir temperaturas en múltiples escenarios, mientras que pavimentos reflectantes y techos verdes complementan las estrategias en áreas densamente urbanizadas. Las soluciones combinadas desarrolladas en Valdivia y Bagdad maximizan el impacto al integrar diferentes enfoques. Adicionalmente, el uso de modelos como ENVI-met y WRF-UCM permite optimizar el diseño de intervenciones urbanas específicas, sin embargo, la efectividad es variable según las condiciones climáticas y urbanas locales, para ello se debe personalizar las estrategias y priorizar enfoques sostenibles para maximizar beneficios térmicos, energéticos y económicos a largo plazo.

IV. Discusión

En la presente revisión se evaluó la pérdida de cobertura natural y expansión urbana en Kumasi, Ghana [20], reportándose el aumento significativo de áreas edificadas y la disminución de bosques lo cual han degradado su ecosistema, exacerbando las ICU. Asimismo, estos patrones se repiten en otras regiones, como indica en la Ref. [31], en Changzhou, China, donde la densidad y estructura de la comunidad arbórea influye directamente en la capacidad de enfriamiento estacional.

Por otro lado, la IG como estrategia es clave en Pekín [24], debido a una variedad de GIT, como árboles, arbustos y cuerpos de agua, lo cual han demostrado reducir significativamente las temperaturas urbanas. Los cuerpos de agua presentan los mayores efectos de enfriamiento, mientras que las superficies permeables también son eficaces. Igualmente, los parques urbanos en EE. UU. actúan como

oasis climáticos, enfriando el ambiente urbano con diferentes índices como intensidad, distancia y eficiencia de enfriamiento [30]. Además, la diversidad de especies arbóreas, medida por índices como Shannon-Wiener, mejora la capacidad de enfriamiento en ciudades como Changzhou [31], ello se debe a que las copas más anchas generan mayor sombra y evapotranspiración, especialmente en verano y otoño, mientras que la densidad excesiva tiene impactos negativos en invierno.

Asimismo, las innovaciones tecnológicas con SRTC, especialmente el STRC5, destacan como una tecnología eficaz para reducir temperaturas en pavimentos urbanos, ofreciendo alta reflectancia en el infrarrojo cercano (71,85%) y visible (35,69%), con durabilidad ante condiciones adversas [28].

Los estudios analizados sobre estrategias para mitigar el efecto de las ICU revelan la eficacia de diversas intervenciones relacionadas con infraestructura verde-azul, diseño urbano y tecnologías innovadoras, por ejemplo; en Guangzhou, el modelo inVEST proyectó un escenario de "Protección Ambiental" que logró una mejora del 21.2% en la mitigación térmica y un ahorro energético del 6.6% [18], mientras que en Seúl, sensores IoT y análisis de regresión espacial identificaron que las áreas con mayor vegetación redujeron significativamente las variaciones térmicas durante el verano y los estudios en techos verdes con el modelo WRF-UCM indicaron que aquellos con pasto generaron mayores reducciones de temperatura (0.13 °C) frente a otras opciones [19].

Igualmente, simulaciones realizadas en Hong Kong, con ENVI-met mostraron que los árboles urbanos lograron las mayores reducciones en temperatura (1.41 °C en aire y hasta 16.49 °C en temperatura radiante media) [22]. De igual forma, estudios en York, Canadá, una expansión de cobertura vegetal disminuyó el calor diario en 4.8 °C y redujo el consumo energético en un 29.2% [23], mientras en Bagdad, estrategias como la transformación de superficies grises en parques y la plantación de árboles densos redujeron la temperatura superficial entre 4 y 22 °C [25], así mismo, en Osaka, pavimentos de alto albedo se identificaron como las estrategias más eficientes para todas las estaciones [26] y finalmente en Valdivia, Chile, la estrategia combinada de pavimentos reflectantes y fuentes de agua redujo hasta 1.4 °C, mientras que el incremento de cobertura vegetal al 17% disminuyó la temperatura en 0.6 °C [27].

V. Conclusión

La revisión sistemática evidenció un creciente interés global en la mitigación de las ICU mediante el uso de IG, infraestructura refractante y áreas verdes y azules. El 46.67% de los estudios revisados se realizaron en China, lo que refleja la relevancia del contexto asiático debido a su densidad poblacional y expansión urbana. Además, el 40% de los estudios incluidos se publicaron en 2024, destacando las investigaciones recientes para enfrentar los desafíos del cambio climático, desarrollando estrategias adaptativas, Sin embargo, el interés de países Latinoamericanos como es en el caso de Chile denota el interés global de la comunidad científica en el estudio de esta problemática.

La implementación de infraestructura verde y azul, pavimentos fríos y cuerpos de agua genera una reducción significativa en las temperaturas urbanas. Como se demostró en los estudios de diversas ciudades buscando una alternativa para la disminución térmica en las ICU, además, la diversidad arbórea y la cobertura del dosel también demostraron ser factores críticos para maximizar los efectos de enfriamiento. Así mismo, el desarrollo de tecnología de recubrimientos reflectantes térmicos, como el STRC5, mostró una alta eficiencia en la regulación térmica de superficies urbanas.

La integración de modelos predictivos y datos satelitales permitió analizar patrones regionales específicos de ICU. Además, la planificación urbana, basada en los datos obtenidos, debe priorizar la expansión y conservación de áreas verdes y azules. Los parques urbanos evaluados evidenciaron su efectividad en la reducción térmica, con intensidades de enfriamiento que varían según las condiciones locales. Así mismo, los árboles con copas anchas y mayor cobertura arbórea demostraron ser esenciales para maximizar el confort térmico en áreas urbanas.

Los estudios de simulaciones evidencian que las implementaciones de plantación de árboles urbanos, el aumento de la cobertura vegetal, los techos verdes y los pavimentos reflectantes tienen un impacto significativo en la reducción de las temperaturas urbanas, el ahorro energético y la mejora del confort térmico. Los desafíos y proyecciones futuras esta enfocado en la integración de IG, nuevas tecnologías y un plan de urbanización sostenible. Sin embargo, persisten desafíos relacionados con la implementación a gran escala, la adaptación a contextos locales y la durabilidad de las soluciones propuestas. Las investigaciones futuras deben centrarse en evaluar la eficacia a largo plazo y el impacto socioeconómico de las estrategias, así como en fortalecer la cooperación internacional para enfrentar el fenómeno de las ICU de manera global.

Agradecimiento/Reconocimiento

Los autores agradecemos a la Universidad Privada del Norte por el apoyo financiero.

Referencias

[1] M. Y. Joshi and J. Teller, "Assessing urban heat island mitigation potential of realistic roof greening across local climate zones: A highly-resolved weather research and forecasting model study," *Science of The Total Environment*, vol. 944, p. 173728, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.173728.

[2] Z. Wu, Y. Zhou, and Y. Ren, "Green space-building integration for Urban Heat Island mitigation: Insights from Beijing's fifth ring road district," *Sustainable Cities and Society*, vol. 116, p. 105917, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.scs.2024.105917.

[3] Z. Wang, Z. Li, Y. Wang, X. Zheng, and X. Deng, "Building green infrastructure for mitigating urban flood risk in Beijing, China," *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 93, p. 128218, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.ufug.2024.128218.

[4] C. Silveira, A. T. C. Dias, F. G. Amaral, G. de Gois, and N. Pistón, "The importance of private gardens and their spatial composition and

configuration to urban heat island mitigation," *Sustainable Cities and Society*, vol. 112, p. 105589, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.scs.2024.105589.
[5] F. Marando *et al.*, "Urban heat island mitigation by green infrastructure in European Functional Urban Areas," *Sustainable Cities and Society*, vol. 77, p. 103564, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.scs.2021.103564.
[6] T. Rezaei, X. Shen, R. Chaiyarat, and N. Pumijumnong, "Effective cooling networks: Optimizing corridors for Urban Heat Island mitigation," *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, vol. 36, p. 101372, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.rsase.2024.101372.
[7] D. Cano, C. Cacciuttolo, A. Haller, C. Rosario, J. C. Guerra, and G. G. de Oliveira, "Spatio-temporal tendencies of urban land surface temperature on the Andean piedmont under climate change: A case study of Metropolitan Lima, Peru (1986–2024)," *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, vol. 36, p. 101378, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.rsase.2024.101378.
[8] M. Palme and C. Carrasco, "Urban heat island in Latin American cities," in *Global Urban Heat Island Mitigation*, Elsevier, 2022, pp. 251–267. Accessed: Jan. 03, 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/b978-0-323-85539-6.00014-7
[9] G. A. Carrillo-Niquete, J. L. Andrade, J. R. Valdez-Lazalde, C. Reyes-García, and J. L. Hernández-Stefanoni, "Characterizing spatial and temporal deforestation and its effects on surface urban heat islands in a tropical city using Landsat time series," *Landscape and Urban Planning*, vol. 217, p. 104280, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.landurbplan.2021.104280.
[10] S. Zheng, X. Chen, and Y. Liu, "Impact of urban renewal on urban heat island: Study of renewal processes and thermal effects," *Sustainable Cities and Society*, vol. 99, p. 104995, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.scs.2023.104995.
[11] C. Ciacci, N. Banti, V. Di Naso, and F. Bazzocchi, "Green strategies for improving urban microclimate and air quality: A case study of an Italian industrial district and facility," *Building and Environment*, vol. 244, p. 110762, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.buildenv.2023.110762.
[12] W. Ouyang, T. E. Morakinyo, Y. Lee, Z. Tan, C. Ren, and E. Ng, "How to quantify the cooling effects of green infrastructure strategies from a spatio-temporal perspective: Experience from a parametric study," *Landscape and Urban Planning*, vol. 237, p. 104808, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.landurbplan.2023.104808.
[13] J. Qiu, X. Li, and W. Qian, "Optimizing the spatial pattern of the cold island to mitigate the urban heat island effect," *Ecological Indicators*, vol. 154, p. 110550, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.ecolind.2023.110550.
[14] M. Dardir, U. Berardi, and J. Wilson, "Health-informed predictive regression for statistical-simulation decision-making in urban heat mitigation," *Sustainable Cities and Society*, vol. 98, p. 104853, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.scs.2023.104853.
[15] S. Jain, S. Sannigrahi, S. Sen, S. Bhatt, S. Chakraborti, and S. Rahmat, "Urban heat island intensity and its mitigation strategies in the fast-growing urban area," *Journal of Urban Management*, vol. 9, no. 1, pp. 54–66, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.jum.2019.09.004.
[16] B. Rech, R. N. Moreira, T. A. G. Mello, T. Klouček, and J. Komárek, "Assessment of daytime and nighttime surface urban heat islands across local climate zones – A case study in Florianópolis, Brazil," *Urban Climate*, vol. 55, p. 101954, May 2024, doi: 10.1016/j.uclim.2024.101954.
[17] T. Rahman, M. Zudhy Irawan, A. Noor Tajudin, M. Rizka Fahmi Amrozi, and I. Widyatmoko, "Knowledge mapping of cool pavement technologies for urban heat island Mitigation: A Systematic bibliometric analysis," *Energy and Buildings*, vol. 291, p. 113133, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113133.
[18] Y. Liu, H. Chen, J. Wu, Y. Wang, Z. Ni, and S. Chen, "Impact of urban spatial dynamics and blue-green infrastructure on urban heat islands: A case study of Guangzhou using Local Climate Zones and predictive modeling," Sustainable Cities and Society, vol. 115, p. 105819, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.scs.2024.105819.
[19] S. Jang, J. Bae, and Y. Kim, "Street-level urban heat island mitigation: Assessing the cooling effect of green infrastructure using urban IoT sensor big data," Sustainable Cities and Society, vol. 100, p. 105007, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.scs.2023.105007.
[20] I. Sarfo et al., "Planning for cooler cities in Ghana: Contribution of green infrastructure to urban heat mitigation in Kumasi Metropolis," Land Use Policy, vol. 133, p. 106842, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.landusepol.2023.106842.
[21] D. Zhu and R. Ooka, "Spatiotemporal distribution of cooling effects from urban-scale rooftop mitigation strategies during high-temperature weather—A case study of the coastal Metropolis Tokyo," Urban Climate, vol. 58, p. 102155, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.uclim.2024.102155.
[22] W. Ouyang, T. E. Morakinyo, Y. Lee, Z. Tan, C. Ren, and E. Ng, "How to quantify the cooling effects of green infrastructure strategies from a spatio-temporal perspective: Experience from a parametric study," Landscape and Urban Planning, vol. 237, p. 104808, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.landurbplan.2023.104808.
[23] M. Dardir, U. Berardi, and J. Wilson, "Health-informed predictive regression for statistical-simulation decision-making in urban heat mitigation," Sustainable Cities and Society, vol. 98, p. 104853, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.scs.2023.104853.
[24] L. Lu, H. Guo, Q. Weng, C. Bartesaghi-Koc, P. Osmond, and Q. Li, "A transferable approach to assessing green infrastructure types (GITs) and their effects on surface urban heat islands with multi-source geospatial data," Remote Sensing of Environment, vol. 306, p. 114119, May 2024, doi: 10.1016/j.rse.2024.114119.
[25] M. F. Abdulateef and H. A. S. Al-Alwan, "The effectiveness of urban green infrastructure in reducing surface urban heat island," Ain Shams Engineering Journal, vol. 13, no. 1, p. 101526, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.asej.2021.06.012.
[26] T. Zheng, K. Qu, J. Darkwa, and J. K. Calautit, "Evaluating urban heat island mitigation strategies for a subtropical city centre (a case study in Osaka, Japan)," Energy, vol. 250, p. 123721, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.123721.
[27] J. I. Morales-González, K. Verichev, and M. Carpio, "Efficiency assessment for the urban heat island mitigation measures in a city with an oceanic climate during the summer period: Case of Valdivia, Chile," Urban Climate, vol. 55, p. 101897, May 2024, doi: 10.1016/j.uclim.2024.101897.
[28] Y. Chen, A. Sha, W. Jiang, P. Du, Q. Lu, and K. Hu, "Development and evaluation of STRC coating for cooling asphalt pavement and mitigating urban heat island effects," Construction and Building Materials, vol. 449, p. 138494, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138494.
[29] R. M. Abou Samra, "'Investigating and mapping day-night urban heat island and its driving factors using Sentinel/MODIS data and Google Earth Engine. Case study: Greater Cairo, Egypt,'" Urban Climate, vol. 52, p. 101729, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.uclim.2023.101729.
[30] Z. Gao, B. F. Zaitchik, Y. Hou, and W. Chen, "Toward park design optimization to mitigate the urban heat Island: Assessment of the cooling effect in five U.S. cities," Sustainable Cities and Society, vol. 81, p. 103870, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.scs.2022.103870.
[31] X. Wang, M. Dallimer, C. E. Scott, W. Shi, and J. Gao, "Tree species richness and diversity predicts the magnitude of urban heat island mitigation effects of greenspaces," Science of The Total Environment, vol. 770, p. 145211, May 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145211.
[32] M. O. Mughal, X.-X. Li, and L. K. Norford, "Urban heat island mitigation in Singapore: Evaluation using WRF/multilayer urban canopy model and local climate zones," Urban Climate, vol. 34, p. 100714, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.uclim.2020.100714.