

CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DEL ENTORNO UNIVERSITARIO PARA LA PLANIFICACIÓN DE INFRAESTRUCTURA VERDE

THERMAL CHARACTERIZATION OF THE UNIVERSITY ENVIRONMENT FOR GREEN INFRASTRUCTURE PLANNING

CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DO AMBIENTE UNIVERSITÁRIO PARA O PLANEJAMENTO DE INFRAESTRUTURA VERDE

Walter Ávila-Ruiz

Magíster en Ingeniería
Estudiante de Doctorado de la Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Baja California
Mexicali, México
<https://orcid.org/0009-0000-3450-1194>
walter.avila@uabc.edu.mx

Carlos Salazar-Briones (autor correspondencia)

Doctor en Ciencias
Profesor investigador de la Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Baja California
Mexicali, México
<https://orcid.org/0000-0002-5237-5539>
csalazar86@uabc.edu.mx

José Ruiz-Gibert

Doctor en Ciencias
Profesor investigador de la Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Baja California
Mexicali, México
<https://orcid.org/0000-0003-4532-7413>
mizael.ruiz@uabc.edu.mx

Juan Saiz-Rodríguez

Doctor en Ciencias
Profesor investigador del Departamento de Ingeniería Civil y Minas
Universidad de Sonora
Hermosillo, México
<https://orcid.org/0000-0002-0046-7298>
alejandro.saiz@unison.mx

Marcelo Lomeli-Banda

Doctor en Ciencias
Profesor investigador de la Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Baja California
Mexicali, México
<https://orcid.org/0000-0003-0171-9394>
lomeli.marcelo@uabc.edu.mx

RESUMEN

El incremento de las temperaturas urbanas, asociado al cambio climático y a la expansión de la infraestructura gris, ha intensificado el fenómeno de isla de calor urbana (ICU), lo que ha afectado el confort térmico en espacios exteriores. Este estudio caracterizó el entorno térmico del campus de la Universidad Autónoma de Baja California en Mexicali, una de las ciudades más calurosas del mundo, con el objetivo de identificar oportunidades para la planificación de infraestructura verde (IV). La metodología incluyó la generación de un ortomosaico de alta resolución mediante un vehículo aéreo no tripulado para el cálculo del índice NGRDI, mediciones in situ de temperatura superficial (LST) con termómetros infrarrojos y el análisis geoespacial de ambas variables. Los resultados mostraron temperaturas más elevadas en superficies impermeables, como el concreto y el asfalto, mientras que las áreas arboladas presentaron valores más bajos. No obstante, se identificaron zonas verdes con bajo vigor vegetal y capacidad de enfriamiento limitada, lo que evidencia la necesidad de fortalecer las estrategias de IV.

Palabras clave

islas de calor urbanas, vegetación, NGRDI, infraestructura verde, planeación

ABSTRACT

The increase in urban temperatures, driven by climate change and the expansion of gray infrastructure, has intensified the urban heat island (UHI) phenomenon, affecting thermal comfort in outdoor spaces. This study characterized the campus thermal environment at the Autonomous University of Baja California in Mexicali, one of the world's hottest cities, to identify opportunities for green infrastructure (GI) planning. The methodology included generating a high-resolution orthomosaic using an unmanned aerial vehicle to calculate the NGRDI index, in situ measurements of land surface temperature (LST) using infrared thermometers, and geospatial analysis of both variables. The results showed higher temperatures on impervious surfaces such as concrete and asphalt, while tree-covered areas presented lower values. However, some green areas with low vegetation vigor showed limited cooling capacity, highlighting the need to strengthen GI strategies.

Keywords

urban heat islands, vegetation, NGRDI, green infrastructure, planning

RESUMO

O aumento das temperaturas urbanas, associado às mudanças climáticas e à expansão da infraestrutura cinza, tem intensificado o fenômeno da ilha de calor urbana (ICU), afetando o conforto térmico em espaços externos. Este estudo caracterizou o ambiente térmico do campus da Universidade Autônoma da Baixa Califórnia em Mexicali, uma das cidades mais quentes do mundo, com o objetivo de identificar oportunidades para o planejamento de infraestrutura verde (IV). A metodologia incluiu a geração de um ortomosaico de alta resolução por meio de um veículo aéreo não tripulado para o cálculo do índice NGRDI, medições in situ da temperatura da superfície (LST) com termômetros infravermelhos e a análise geoespacial de ambas as variáveis. Os resultados mostraram temperaturas mais elevadas em superfícies impermeáveis, como o concreto e o asfalto, enquanto as áreas arborizadas apresentaram valores mais baixos. No entanto, foram identificadas zonas verdes com baixo vigor vegetal e capacidade limitada de resfriamento, o que evidencia a necessidade de fortalecer as estratégias de infraestrutura verde.

Palavras-chave

ilhas de calor urbanas, vegetação, NGRDI, infraestrutura verde, planejamento

INTRODUCCIÓN

La aceleración de la urbanización a nivel global, particularmente en países en vías de desarrollo, ha generado una fuerte concentración poblacional en las ciudades, donde actualmente habita aproximadamente el 55 % de la población mundial (United Nations, 2018; Valavanidis, 2024). Este proceso, en combinación con el cambio climático, ha intensificado el fenómeno de isla de calor urbana (ICU), que deteriora las condiciones ambientales del entorno construido y afecta de manera directa la salud de la población y el confort térmico en espacios exteriores. Los efectos adversos del sobrecalentamiento urbano se manifiestan tanto en el bienestar psicológico como en la percepción del calor, el estado emocional y la capacidad de concentración, así como en impactos fisiológicos asociados, tales como quemaduras solares y otros trastornos relacionados con la exposición térmica (Rony & Alamgir, 2023). En este contexto, el confort térmico en espacios exteriores se ha convertido en un factor de creciente relevancia para la calidad de vida urbana.

Las ICU constituyen un fenómeno ambiental caracterizado por un incremento de la temperatura media en las áreas urbanas en comparación con las zonas rurales circundantes (Garzón et al., 2024). Este fenómeno es consecuencia directa de las actividades humanas y de la transformación del paisaje natural, donde predominan materiales artificiales que alteran el balance térmico original de la superficie terrestre, incrementándose la absorción y retención de calor (Oke, 1982).

Debido al aumento de las temperaturas urbanas y al agravamiento del fenómeno de ICU, diversos estudios han señalado que el confort térmico en espacios exteriores urbanos es un elemento clave para el bienestar de la población. En los procesos de diseño urbano, se ha enfatizado la necesidad de considerar el impacto térmico del entorno construido y de promover investigaciones orientadas a mejorar la habitabilidad exterior, particularmente a escala micro climática (Mandjoupa et al., 2025). La ICU se caracteriza por la cuantificación de indicadores que se presentan en la temperatura del aire, específicamente a partir de la zona más baja de la atmósfera, hasta la altura de los árboles o edificios (Arnfield, 2003; Stewart, 2011). Además del fenómeno de la Isla de Calor Urbano (ICU), la temperatura superficial terrestre (Land Surface Temperature – LST por sus siglas en inglés) constituye una variable fundamental para el análisis del balance de energía superficie-atmósfera. Mientras que la ICU se caracteriza a partir de la temperatura del aire, la LST representa la temperatura de la superficie y es una de las principales variables utilizadas para evaluar este fenómeno desde una perspectiva superficial (Schwarz et al., 2012; Krishnan et al., 2020). En este sentido, es importante distinguir entre la Isla de Calor Urbano atmosférica

(Urban Heat Island, UHI), asociada a la temperatura del aire dentro del dosel urbano, y la Isla de Calor Urbano Superficial (ICUS o Surface Urban Heat Island, SUHI), derivada del análisis de la LST (Voogt & Oke, 2003). Esta última permite caracterizar las variaciones térmicas de la superficie mediante técnicas de teledetección, que proporcionan información espacialmente continua del comportamiento térmico urbano.

La literatura especializada indica que para que un espacio urbano presente condiciones adecuadas de confort térmico debe cumplir, al menos, con tres criterios fundamentales: la configuración morfológica del entorno construido, la orientación espacial de sus componentes y la presencia de vegetación (Yahia & Johansson, 2014). Estudios como los de Wu et al. (2024) indican que al aumentar un 1% en la cobertura vegetal reduce la temperatura superficial de 0.099–0.1 °C en entornos urbanos, donde se ha observado que la sombra generada por los árboles puede aportar hasta el 80% del efecto total de enfriamiento en espacios abiertos (Shashua-Bar & Hoffman, 2000), que consolidan la vegetación como un elemento clave en la regulación micro climática urbana (Declet-Barreto et al., 2013).

La vegetación juega un papel importante para la mitigación de altas temperaturas superficiales, ya que algunas propiedades como la evapotranspiración, reducen la temperatura del ambiente. No obstante, al presentarse daño o estrés en la vegetación, el enfriamiento ambiental podría verse reducido (Speak, 2015).

Existen diversos índices que describen la salud de la vegetación, siendo el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI por sus siglas en inglés) el más utilizado en la literatura (Huang et al., 2021). Comúnmente este índice se obtiene mediante el uso cámaras multispectrales montadas en Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT), también conocido como drones. Sin embargo, estos equipos suelen ser costosos, limitándose su adquisición (Stamford et al., 2023). Como alternativa, se pueden utilizar índices basados únicamente en bandas RGB (Rojo/Verde/Azul) para identificar y diferenciar vegetación y/o cultivos de suelos u otras superficies, así como para evaluar la salud de la vegetación.

Estudios como los de Macedo et al., (2025), concluyen que uno de los índices más fiables para la detección de salud de la vegetación basados en bandas RGB es el Índice de Diferencia Normalizado Verde/Rojo (Normalized Green Red Difference Index - NGRDI por sus siglas en inglés), siendo un índice más accesible de estimar. En su estudio, tuvieron como objetivo la detección de maleza entre los viñedos en el periodo de ciclo de cultivos se utilizaron imágenes RGB obtenidas a partir de VANT, evaluándose diversos índices de vegetación, siendo el NGRDI el índice que mostró mejores resultados, diferenciándose de manera solida las clases de vid y suelo, y detectándose

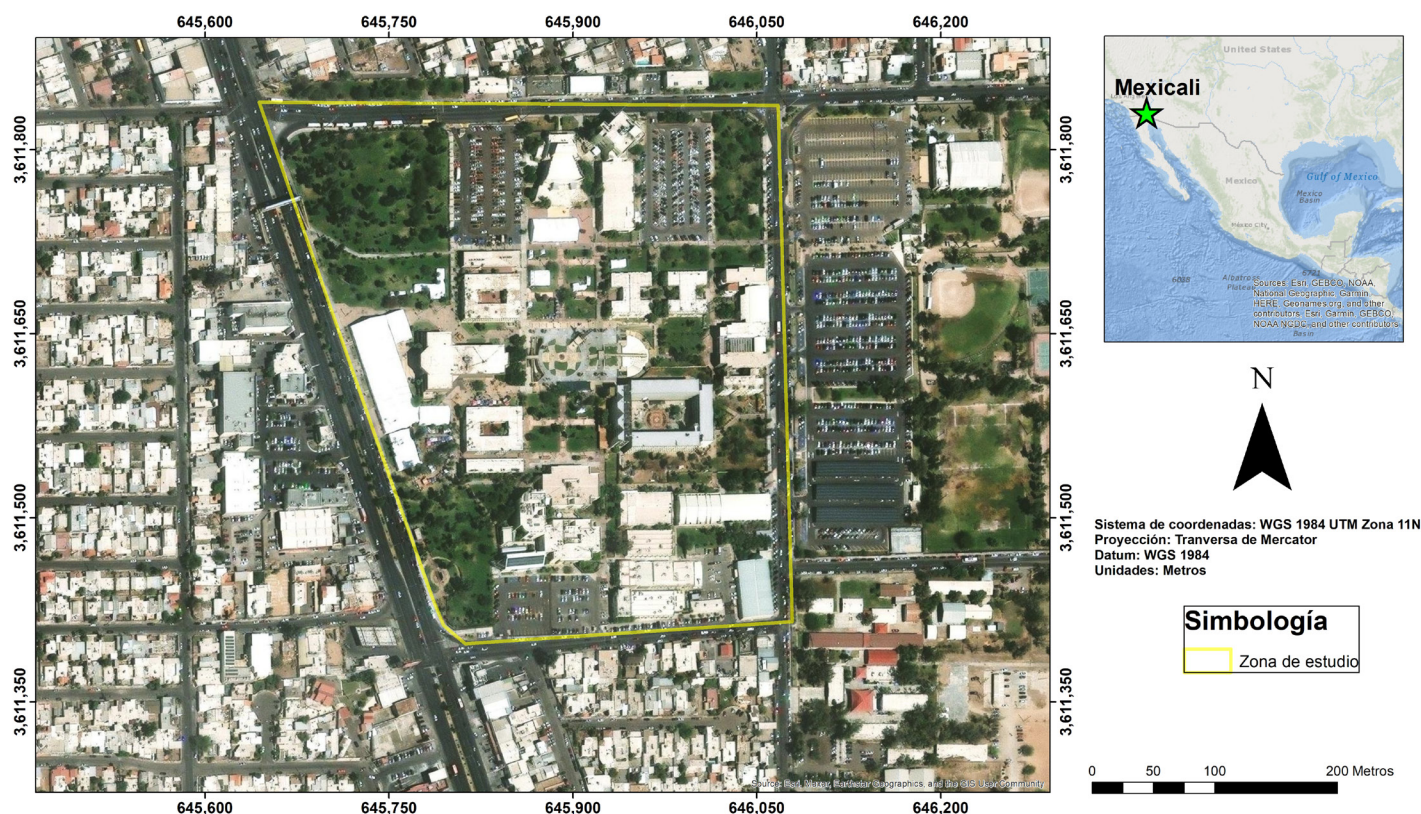


Figura 1. Localización de la zona de estudio. Fuente: Elaboración de los autores.

maleza de manera más precisa en comparación a otros índices.

También, Lee & Yu (2019), realizaron una investigación para proponer un método para la detección automática de árboles con poca salud y muertos, en el que, se utilizó el NGRDI como índice de salud de vegetación, obteniendo resultados con un nivel de confianza superior al 80 % en la detección de árboles muertos, lo que demuestra que el NGRDI también es un índice que indica la salud de la vegetación.

Por ello, el presente estudio tiene como objetivo analizar la relación entre la temperatura superficial terrestre (LST) y las condiciones de la vegetación mediante el índice NGRDI en el campus universitario. A partir de esta relación, se busca identificar áreas con alto estrés térmico y bajo desempeño vegetal, con el fin de aportar criterios para la planificación, diseño y gestión de infraestructura verde orientada a la mitigación de alta LST y la mejora del confort térmico.

ZONA DE ESTUDIO

La unidad central de la Universidad Autónoma de Baja California, campus Mexicali se encuentra ubicada en la ciudad de Mexicali, Baja California, México, con coordenadas UTM 645893 Este y 3611631 Norte en el sistema de coordenadas WGS84 zona 11N, (Figura 1). El campus cuenta con una extensión de aproximadamente

de 14.4 Ha, de las que el 24 % corresponde a áreas verdes (4.3 Ha), sin contemplar pequeñas áreas como jardinerías. Este sitio cuenta con extensiones de áreas verdes claves para el bienestar ambiental, que aportan sombra, a la comunidad universitaria (Gutiérrez Boneo, 2025), sin embargo, las condiciones climatológicas de la ciudad pueden limitar el estado de salud de la vegetación, al reducir su capacidad en la disminución de la LST.

CLIMA DE LA CIUDAD Y PROBLEMÁTICAS DE TEMPERATURA SUPERFICIAL

La ciudad se caracteriza por tener un clima desértico cálido, al presentar temperatura promedios entre los 41°-42° C entre los meses de julio y agosto (Ayuntamiento de Mexicali, 2024), sin embargo, dentro de los periodos de la canícula, las temperaturas pueden superar los 50° C, siendo de 52. 7° C la temperatura más alta registrada históricamente en la ciudad el 7 de agosto de 2025 (Heras, 2025), convirtiéndola en la ciudad con la mayor temperatura registrada en México y siendo una de las ciudades más calurosas del mundo. Además de las características climatológicas de la región, el crecimiento avanzado de infraestructura gris contribuye en el aumento de temperatura de la superficie lo que aumenta el efecto de ICU (Yang et al., 2021).

El Ayuntamiento de Mexicali estableció el marco normativo local mediante el Reglamento de áreas verdes para el municipio de Mexicali (Ayuntamiento

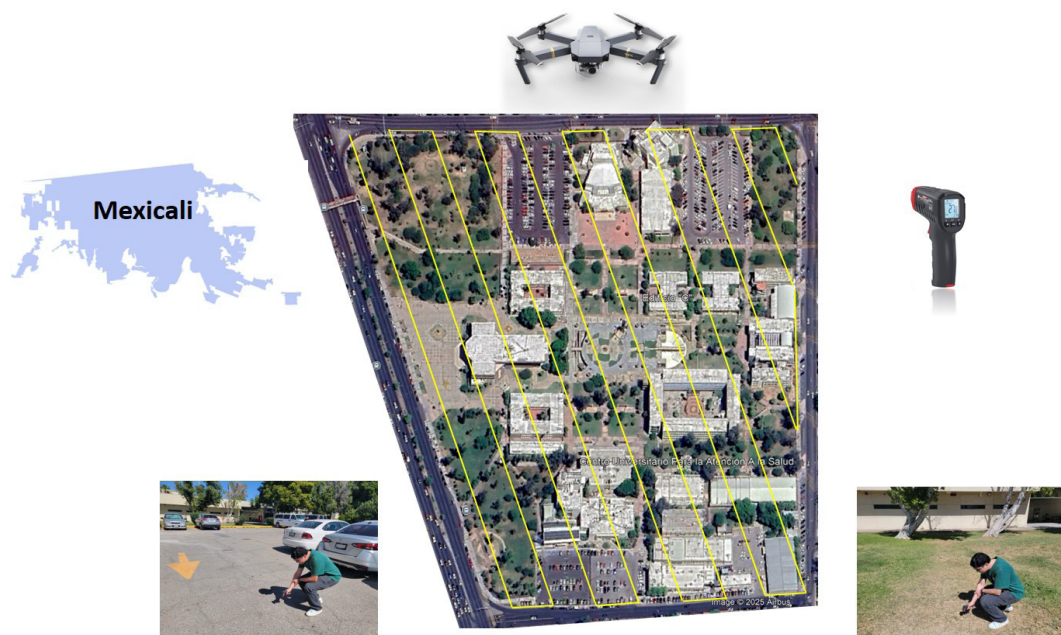


Figura 2. Metodología de trabajo. Fuente: Elaboración de los autores.

de Mexicali, 2005). En su diseño original, el Artículo 11 estipulaba que la construcción de centros comerciales y obras con estacionamiento al aire libre para más de nueve automóviles requería la plantación de un árbol por cada seis cajones. Sin embargo, tras la reforma publicada en el Periódico Oficial del Estado de Baja California en 2015, dicha exigencia se duplicó a un árbol por cada tres cajones de estacionamiento, facultando a la autoridad a negar los permisos de construcción correspondientes en caso de incumplimiento (Ayuntamiento de Mexicali, 2005; reformado en 2015). A pesar de la existencia de este mecanismo punitivo, la mayoría de los estacionamientos en plazas comerciales y espacios públicos exhiben un desacato a la norma. Como consecuencia, estas superficies quedan expuestas directamente a la radiación solar, lo que intensifica el efecto de isla de calor microurbana y eleva el estrés térmico de los usuarios.

No obstante, estas regulaciones solo establecen la plantación de árboles, sin embargo, no incorpora criterios que contribuyan eficientemente en la disminución de la temperatura e ICU.

METODOLOGÍA

De manera general, el presente proyecto se desarrolló en tres etapas metodológicas (Figura 2). En la primera, se generó una imagen de alta resolución (ortomosaico) mediante el uso de un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) para el cálculo del Índice de Diferencia Normalizada Rojo-Verde (NGRDI) y la caracterización espacial de la condición vegetal dentro del campus universitario. En la segunda

etapa, se obtuvieron datos de temperatura superficial del suelo (LST) mediante mediciones in situ con termómetros infrarrojos, siguiendo un protocolo estandarizado para garantizar la consistencia de los registros. Finalmente, ambas variables fueron integradas en un entorno de análisis geoespacial para evaluar su relación y grado de correlación, permitiendo identificar patrones espaciales asociados al estrés térmico y al desempeño vegetal.

VUELO FOTOGRAMÉTRICO MEDIANTE EL USO DE VANT

El vuelo fotogramétrico se realizó al utilizar un VANT marca DJI, modelo Mavic Pro y el uso de la aplicación DroneDeploy. Para la configuración del plan de vuelo, cuyos parámetros empleados se muestran en la tabla 1, con el objetivo de obtener una imagen de alta resolución (ortomosaico) del campus universitario utilizándose el programa Agisoft Metashape versión 1.8.0 y con este insumo, también calcular el NGRDI.

Tabla 1. Parámetros de configuración de vuelo fotogramétrico. Fuente: Elaboración de los autores.

Configuración de vuelo fotogramétrico	
Superficie de vuelo	15 hectáreas
Tiempo de vuelo	13:55 minutos
Altura de vuelo	80 metros
Ángulo de posición de cámara	90°
Porcentaje de traslape entre fotografías	80%

CÁLCULO DE NGRDI

Para el cálculo de NGRDI, se realizó una composición de las bandas verde y roja derivadas del vuelo fotogramétrico, utilizándose la siguiente ecuación (Ecuación 1).

$$NGRDI = \frac{GREEN - RED}{GREEN + RED} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Para realizar esta composición de bandas, se utilizó el programa ArcGIS versión 10.5 y su herramienta Raster Calculator. De acuerdo con la literatura el resultado de esta composición de bandas el índice NGRDI presenta rangos entre -1 y 1, cuyos valores negativos se relacionan a superficies sin cobertura vegetal y cuerpos de agua, mientras que valores cercanos a 0 indican suelos desnudos o salud vegetal deficiente. Por otra parte, valores positivos cercanos a 1 indican vegetación densa y saludable (Jannoura et al., 2015).

ADQUISICIÓN DE DATOS DE TEMPERATURA SUPERFICIAL

Para la adquisición de datos de temperatura superficial, se realizó un levantamiento in situ, se utilizaron termómetros infrarrojos marca UNI-T modelo UT306S, se realizaron mediciones a una distancia de 0.10 m con respecto a la superficie, que abarcó la superficie total de campus universitarios y sus diversas coberturas de suelo con la finalidad de garantizar adquisición de datos precisos, para generar una superficie de temperatura tipo raster utilizándose el programa ArcGIS versión 10.5. La actividad de adquisición de datos se llevó a cabo el día 12 de mayo del 2025, entre las horas 1:15pm-2:15pm.

EVALUACION DE CORRELACIÓN ENTRE NGRDI Y TEMPERATURA SUPERFICIAL.

Para evaluar la relación estadística entre las variables de NGRDI y temperatura superficial, se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson (r). Este coeficiente cuantifica la relación lineal continua entre dos variables numéricas y es utilizado comúnmente en estudios de percepción remota (Rahimi et al., 2025).

El coeficiente de Pearson se calcula mediante la siguiente expresión (Ecuación 2):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

r: Coeficiente de correlación de Pearson.
xi: Corresponde a los valores de NGRDI.
yi: Corresponde a los de la temperatura superficial.
 $\bar{x}$ y $\bar{y}$: Representan las medias de cada variable.
n: Número total de observaciones.

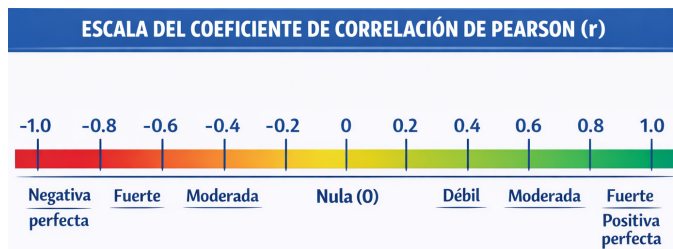


Figura 3. Escala de coeficiente de correlación de Pearson (r). Fuente: Elaboración de los autores.

Los valores del coeficiente r oscilan entre -1 y 1 (Figura 3).

Para el caso de estudio, los valores negativos indican una relación inversa, es decir, a mayor salud de la vegetación (mayor NGRDI), menor temperatura superficial, mientras que valores positivos indican una relación directa. Otra variable considerada en el análisis fue el coeficiente de determinación (R^2), que corresponde al cuadrado del coeficiente de correlación r y representa la proporción de la varianza de la variable dependiente explicada por la variable independiente (Duke University, 2002). En este estudio, la variable dependiente corresponde a la temperatura superficial, mientras que la variable independiente es el índice NGRDI.

RESULTADOS

VUELO FOTOGRAMÉTRICO Y GENERACIÓN DE ORTOMOSAICO

Se obtuvieron y procesaron un total de 297 imágenes aéreas del campus universitario a una altura de vuelo de 70m sobre el nivel de suelo y un traslape ente fotografías del 80%, y mediante el uso del programa Agisoft Metashape, se generó un ortomosaico con una resolución espacial de 5cm/pixel (Figura 4), con esta imagen, se identifica con mayor claridad los diversos materiales que se encuentran en la superficie del campus.

EVALUACIÓN DE SALUD DE VEGETACIÓN POR NGRDI

Mediante la composición de las bandas espectrales RGB se pudo determinar el estado de salud de la vegetación dentro del campus universitario, demostrado en valores de -0.33 a 0.24, donde los valores negativos representan vegetación en malas condiciones y valores positivos representan vegetación más saludable (Figura 5).

Dentro de las áreas verdes del campus se identificaron zonas con valores negativos de NGRDI, principalmente asociadas a superficies cubiertas por pasto. La validación mediante observación de campo indicó condiciones

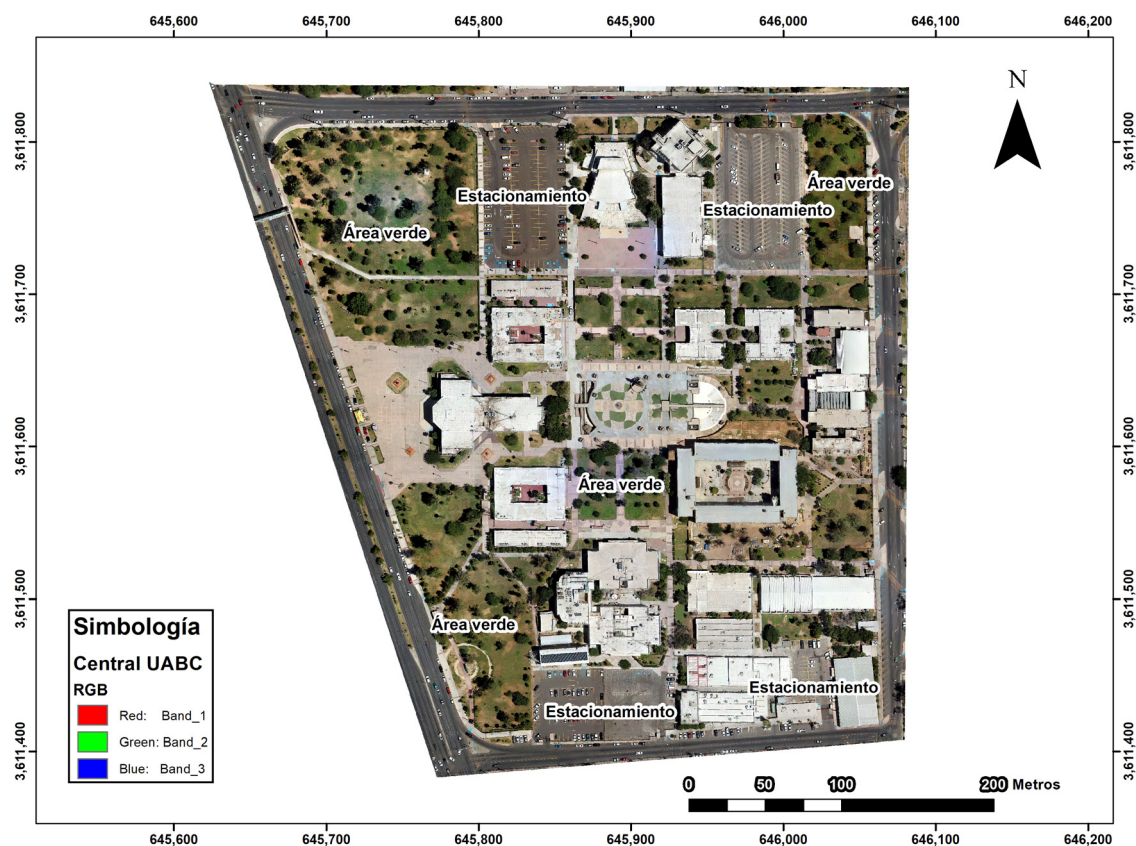


Figura 4. Ortomosaico del campus universitario, resolución espacial de 5cm/píxel. Fuente: Elaboración de los autores.

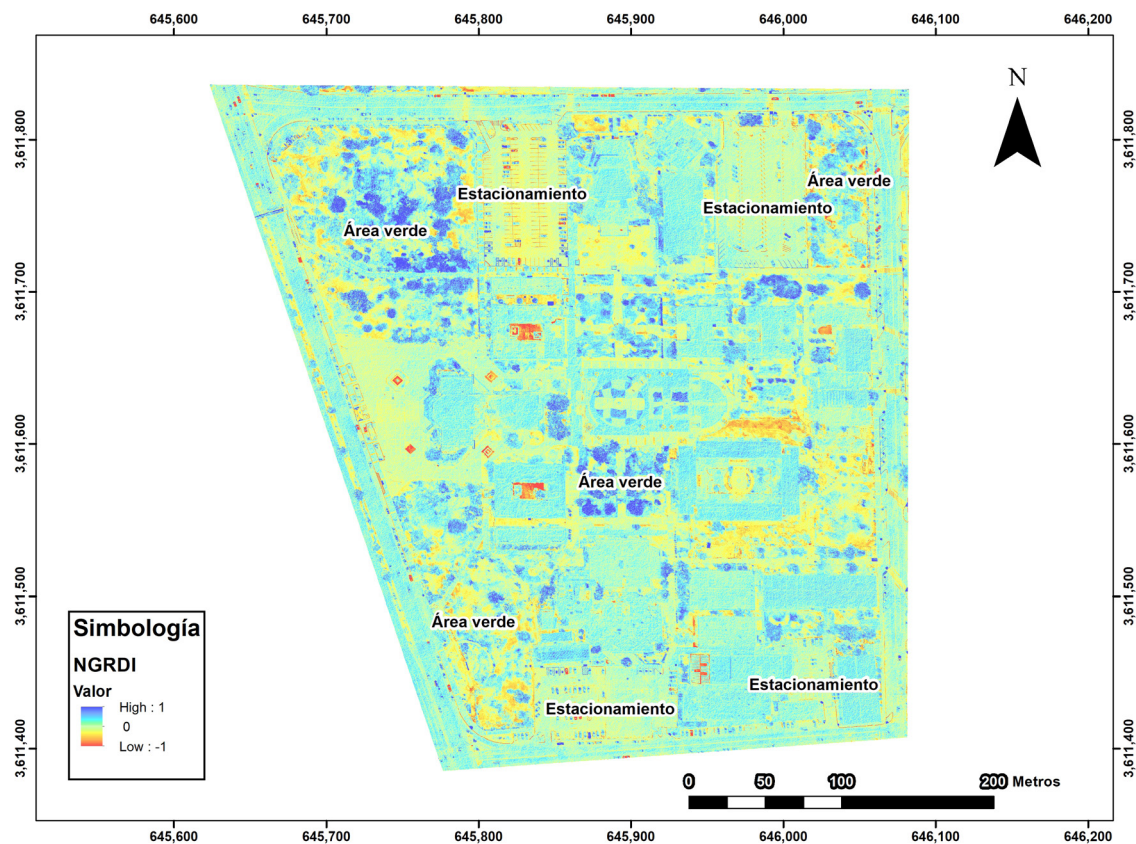


Figura 5. Mapa de NGRDI del campus universitario. Fuente: Elaboración autores.

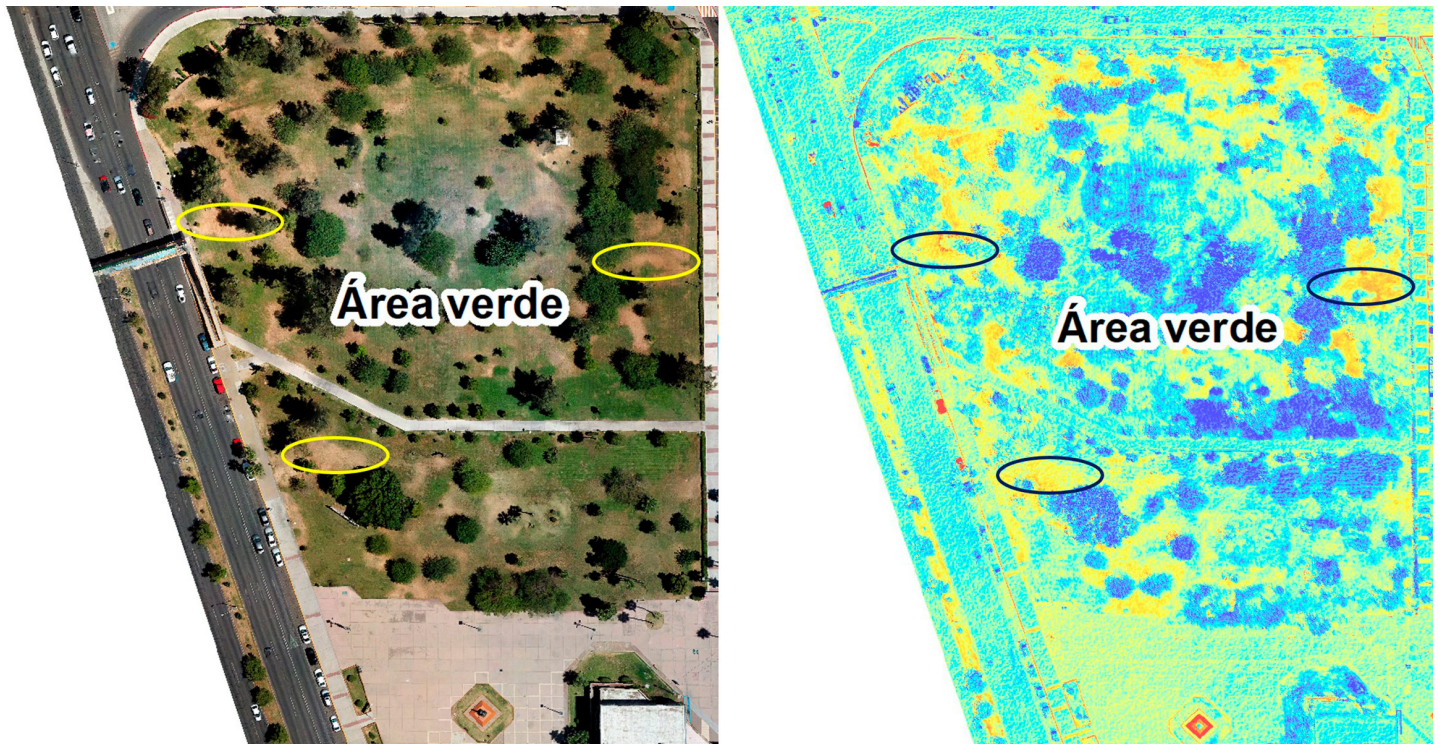


Figura 6. Ejemplo de NGRDI negativo en vegetación y verificación visual. Fuente: Elaboración de los autores.

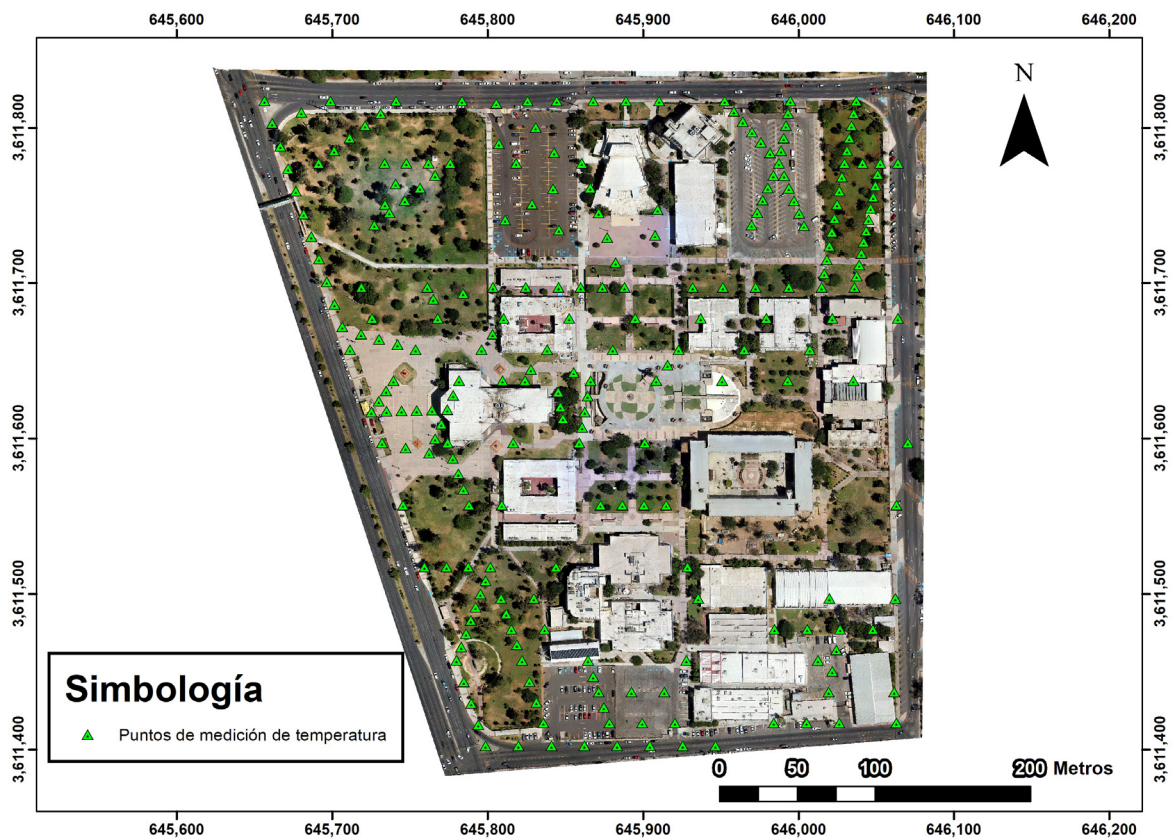


Figura 7. Distribución de puntos de medición de temperatura. Fuente: Elaboración de los autores..

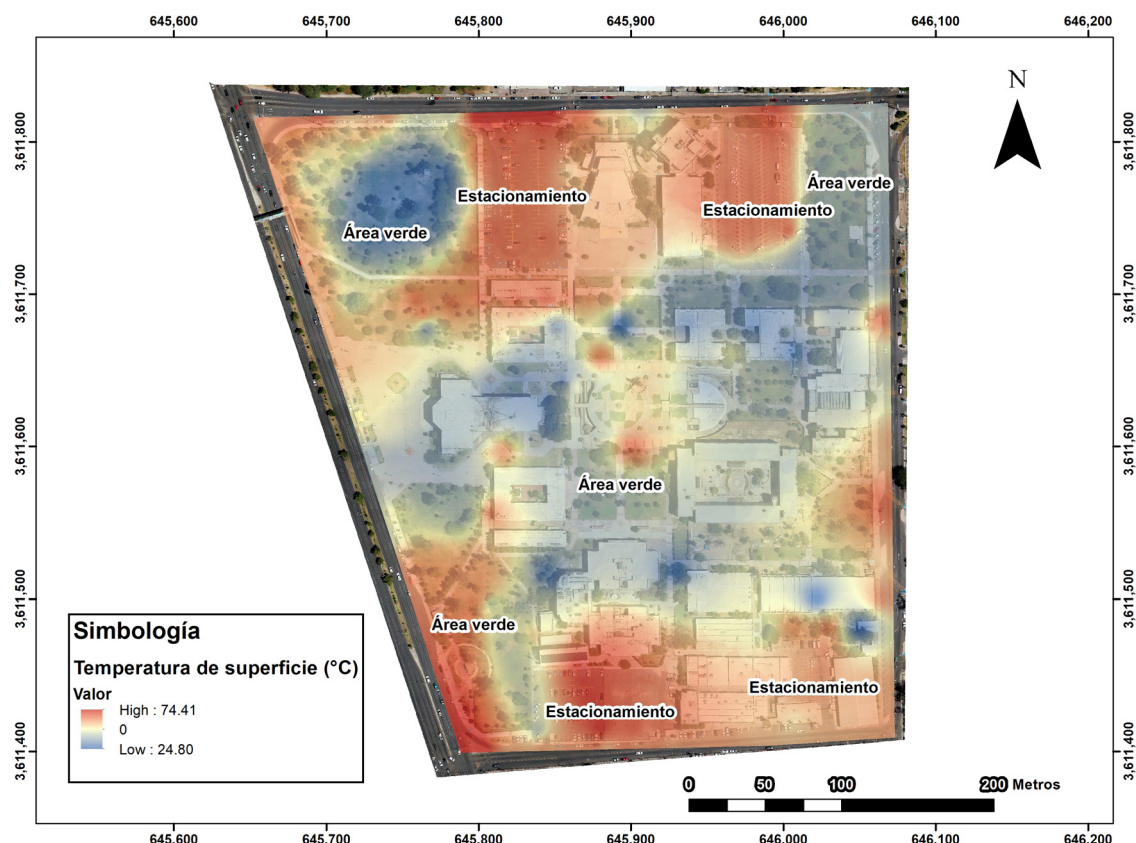


Figura 8. Mapa de temperaturas superficiales generado mediante los datos adquirido el día 15 de mayo de 2025.
Fuente: Elaboración de los autores.

de bajo vigor vegetativo en estas áreas. Estas áreas presentaron temperaturas superficiales relativamente más altas en comparación con aquellas dominadas por cobertura arbórea. La coincidencia espacial entre valores negativos de NGRDI y mayores temperaturas superficiales sugiere un menor vigor vegetativo y una limitada capacidad de estas superficies para contribuir a la mitigación térmica (Figura 6).

GENERACIÓN DE TEMPERATURA DE SUPERFICIE

Se obtuvieron un total de 246 puntos de temperatura superficial del campus universitario (Figura 7), cuyos datos fueron utilizados para generar una superficie raster de temperatura superficial, asimismo, se utilizó el método de interpolación de distancia inversa ponderada (IDW por sus siglas de inglés), obteniendo como resultado una superficie cuyos valores mínimos de temperatura rondaban los 24.8°C y máximos de 72.4°C, tal como se muestra en la Figura 8.

Los valores mínimos de temperatura se presentaron dentro de las áreas verdes, específicamente donde se encontraban las sombras de los árboles, se obtuvieron diferencias de temperatura entre 5°C y 6°C en comparación a las áreas verdes que se encontraban expuestas directamente a la luz solar, lo que reafirma la importancia de los árboles para la mitigación a las altas

temperaturas, especialmente en ubicaciones geográficas de climas áridos y semi áridos.

Si bien, el método IDW es utilizado en análisis espacial y ha sido considerado como un método efectivo para la interpolación de temperatura (Lau & Hsu, 2025), su precisión depende fuertemente de la distribución espacial de los puntos de muestreo, pudiendo presentarse resultados imprecisos cuando éstos son irregulares, especialmente en contextos ambientales donde la densidad de datos es heterogénea (Ohlert et al., 2023). Además, los valores extremos de la superficie interpolada se restringen en los puntos medidos, lo que limita la detección de máximos y mínimos reales (Longley et al., 2005). Para el caso de estudio, la heterogeneidad de los puntos se vio limitada debido a la complicación de acceso a zonas del campus universitario y presencia de elementos que dificultaban la adquisición de datos.

CORRELACIÓN ENTRE NGRDI Y SUPERFICIE DE TEMPERATURA

El coeficiente de correlación de Pearson (r) entre el NGRDI y la temperatura superficial fue de -0.122 , lo que indica una relación inversa débil entre la presencia de vegetación y la temperatura de la superficie. Aunque la vegetación contribuye a la reducción de la temperatura superficial, los resultados sugieren que su influencia

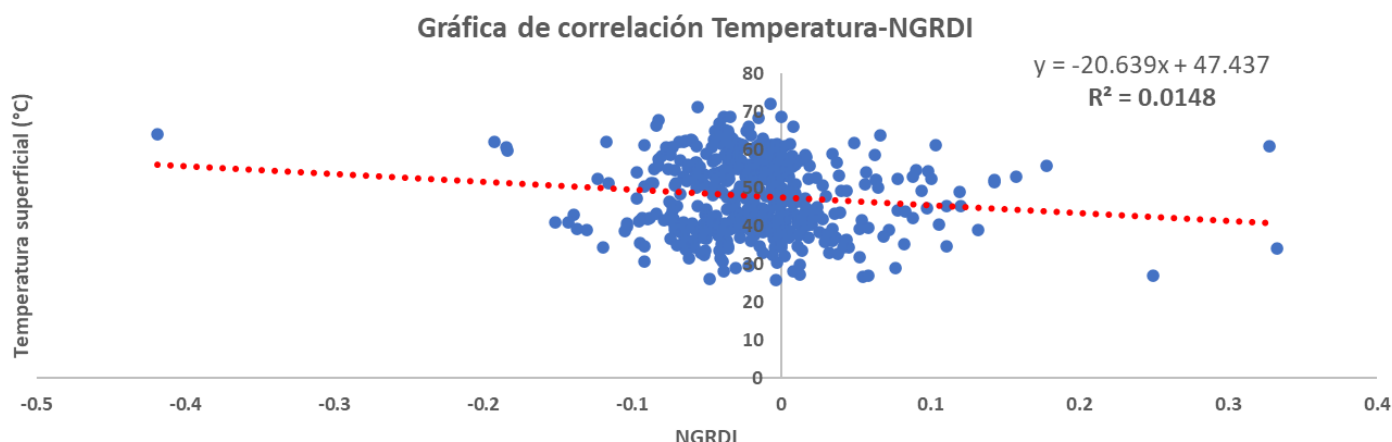


Figura 9. Análisis comparativo de la correlación entre la temperatura superficial y NGRDI. Fuente: Elaboración de los autores.

no es un factor dominante para explicar la variabilidad térmica dentro del campus universitario. El coeficiente de determinación (R^2) fue de 0.0148 (Figura 9), lo que indica que únicamente el 1.48% de la variabilidad térmica observada puede ser explicado por las variaciones en el NGRDI.

Diversos estudios han documentado una relación negativa entre los índices de vegetación, como el NGRDI, y la temperatura de la superficie terrestre (Anand et al., 2025; Dheeraj et al., 2025). Este comportamiento se explica principalmente por los efectos de sombreado de los árboles y los procesos de evapotranspiración, los que influyen en la regulación del almacenamiento térmico de la superficie (Yin et al., 2024). No obstante, en el área de estudio se observa una correlación débil entre ambas variables. Este resultado podría estar asociado con la elevada cobertura de superficies impermeables, como asfalto y concreto, así como con la presencia de vegetación con bajo vigor y áreas de suelo desnudo. Adicionalmente, las condiciones climáticas semi áridas características de la región pueden limitar la capacidad de la vegetación para inducir procesos efectivos de enfriamiento ambiental (Dashti & Khajah, 2024).

DISCUSIÓN

Un hallazgo relevante de esta investigación es la identificación de zonas con bajo desempeño vegetal y alto estrés térmico dentro del campus universitario, particularmente en las áreas suroeste y centro-este, donde se registraron valores negativos de NGRDI cercanos a -1, asociados a vegetación en condiciones deficientes o ausente. Estas zonas coinciden espacialmente con superficies dominadas por materiales impermeables, como estacionamientos, los que presentaron las temperaturas superficiales más elevadas, que alcanzaron hasta 71.4 °C. Este comportamiento evidencia el papel

determinante de la infraestructura gris en la acumulación de calor, influenciado además por propiedades como el albedo, que regula la absorción de radiación solar y contribuye al incremento de la temperatura superficial. En este contexto, diversos estudios (Franco et al., 2025; Zhao et al., 2025) han señalado que la implementación de superficies permeables en combinación con cobertura vegetal favorece la disipación de la energía térmica mediante procesos evaporativos y de evapotranspiración. Sin embargo, los resultados obtenidos también ponen de manifiesto que no toda la vegetación contribuye de manera efectiva al enfriamiento superficial. En entornos áridos como Mexicali, existe una disyuntiva entre la conservación del agua y la eficiencia térmica, ya que, aunque los programas de reforestación y normativas locales priorizan el uso de especies endémicas (Ayuntamiento de Mexicali, 2020), estas presentan adaptaciones fisiológicas orientadas a la reducción de la pérdida hídrica, lo que limita sus tasas de evapotranspiración y, por ende, su capacidad de enfriamiento. En consecuencia, la planificación de la infraestructura verde no debería centrarse únicamente en la incorporación de vegetación nativa, sino en una selección funcional que considere su desempeño térmico. Se propone, por tanto, priorizar especies que, dentro de la paleta vegetal permitida, presenten mayor eficiencia en el enfriamiento, con el fin de optimizar el equilibrio entre eficiencia hídrica y capacidad de mitigación térmica. Este enfoque permitiría transitar de una visión convencional de reforestación hacia una estrategia de diseño climático, orientada a responder simultáneamente al estrés hídrico y a las condiciones extremas de temperatura identificadas en el área de estudio.

CONCLUSIONES

Este estudio caracterizó el entorno térmico del campus de la UABC en Mexicali considerando variables como uso de suelo, materiales de superficie, temperatura superficial

y estado de la vegetación. Los resultados permitieron identificar patrones espaciales del comportamiento térmico dentro del campus y su interacción con el entorno urbano. Las temperaturas superficiales más elevadas se registraron en superficies impermeables, particularmente en concreto y asfalto, mientras que los valores más bajos se observaron en áreas verdes, especialmente bajo la sombra de los árboles. No obstante, aunque las zonas verdes mostraron una tendencia general de enfriamiento superficial, se identificaron áreas donde la vegetación no contribuyó significativamente a la reducción térmica, principalmente en zonas con césped deteriorado y bajos valores del índice NGRDI. Los resultados obtenidos coinciden con lo reportado en la literatura, donde la falta de cobertura vegetal, salud deficiente de la vegetación y el incremento de infraestructura gris, incrementan la absorción del calor y reduce la capacidad de enfriamiento del entorno.

La tendencia es la esperada, sin embargo, la relación es débil debido a la salud y la configuración del espacio vegetal, por lo que una de las áreas de oportunidad sería intervenir en las zonas de baja salud con IV para subsanar el déficit de enfriamiento que aportan estas áreas actualmente.

Con respecto a la vegetación, el sombreado de los árboles es uno de los factores más importantes para el enfriamiento urbano, ya que disminuye la temperatura superficial entre 5 y 6 °C, que muestran mejores resultados en comparación con el césped, donde se identificaron sitios con bajo vigor. No obstante, la disponibilidad de agua y las condiciones climatológicas, como la temperatura y la radiación solar, condicionan la capacidad de enfriamiento de los árboles; por ende, se debe planificar estratégicamente la IV, al priorizar factores como la plantación de árboles endémicos de la región que presenten las mayores tasas de evapotranspiración. Por ello, es recomendable realizar estudios sobre las capacidades de enfriamiento de la vegetación endémica de estas regiones y, a su vez, desarrollar estudios enfocados en las implicaciones de diseño y gestión de la IV, que contemplen variables como la cobertura y uso de suelo, las propiedades de los materiales y las simulaciones de microclima. Esto permitirá determinar variables de confort térmico, las que describen el estado físico y el bienestar psicológico que experimenta el individuo en su entorno, contribuyendo así a mejorar su calidad de vida.

LIMITACIONES

El presente estudio se basa en un análisis térmico realizado en un momento específico del tiempo, lo que limita la evaluación de la variabilidad estacional de la temperatura superficial. No obstante, el levantamiento de información se realizó durante el mes de mayo de 2025, periodo en el que la ciudad de Mexicali presenta condiciones térmicas elevadas que pueden superar los 40 °C, permitiendo caracterizar el comportamiento térmico

del campus bajo condiciones de calor significativo. Es posible que durante los periodos de mayor intensidad térmica del verano las temperaturas superficiales sean aún más elevadas. Asimismo, las condiciones climáticas semi áridas pueden generar estrés hídrico en la vegetación, lo que podría influir en su capacidad de enfriamiento. En este sentido, futuros estudios podrían incorporar análisis temporales más amplios para comprender con mayor detalle la dinámica térmica y el papel de la vegetación en la mitigación de la isla de calor urbana.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRediT

Conceptualización, C.S.B.; Curación de datos, J.M.R.G., J.A.S.R.; Análisis formal, C.S.B., J.M.R.G.; Investigación, W.A.R.; Metodología, W.A.R., C.S.B.; Software, W.A.R., J.M.R.G., J.A.S.R.; Validación, J.M.R.G., J.A.S.R.; Visualización, M.A.L.B.; Escritura – borrador original, W.A.R., C.S.B.; Escritura – revisión y edición, C.S. B., M.A.L.B.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada para la formación académica de uno de los autores. Esta investigación no contó con ningún otro financiamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anand, V., Kaur, S., Rajput, V. D., Minkina, T., Mandzhieva, S., Kumar, S., Sharma, A., & Kumar, S. (2025). Analyzing the spatial relationship between land surface temperature and normalized difference vegetation index using remote sensing and GIS. *Discover Geoscience*, 3(1), 65. <https://doi.org/10.1007/s44288-025-00167-w>
- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1–26. <https://doi.org/10.1002/joc.859>
- Ayuntamiento de Mexicali. (2005). *Reglamento de áreas verdes para el municipio de Mexicali, Baja California*. Gobierno Municipal de Mexicali. <https://www.ordenjuridico.gob.mx/Estatal/BAJA%20CALIFORNIA/Municipios/Mexicali/REG01.pdf>
- Ayuntamiento de Mexicali. (2020). *Guía de forestación para el municipio de Mexicali, baja California*. Gobierno Municipal de Mexicali. <https://www.scribd.com/document/610318541/2021-Guia-Municipal-de-Forestacion-para-el-Municipio-de-Mexicali-2021>

- Ayuntamiento de Mexicali. (2024). *Atlas de Riesgos del Municipio de Mexicali, B.C. [Actualización 2023]*. Universidad Autónoma de Baja California [UABC]. Unidad Municipal de Protección Civil. <http://www.mexicali.gob.mx/transparencia/administracion/atlas/pdf/0.pdf>
- Dashti, A., & Khajah, M. (2024). Urban green areas and their impact on land surface temperature in semi-arid environments: a case study in Kuwait. *GeoJournal*, 89, 86. <https://doi.org/10.1007/s10708-024-11079-6>
- Declét-Barreto, J., Brazel, A. J., Martin, C. A., Chow, W. T., & Harlan, S. L. (2013). Creating the park cool island in an inner-city neighborhood: heat mitigation strategy for Phoenix, AZ. *Urban Ecosystems*, 16(3), 617-635. <https://doi.org/10.1007/s11252-012-0278-8>
- Dheeraj, V. P., Rai, A. K., Yadav, A. K., Sonkar, S., Maurya, A., Chaudhary, A., & Chaudhary, P. (2025). Spatiotemporal analysis and correlation of surface temperature, vegetation cover, and water index using remote sensing and GIS techniques in Ambedkar Nagar, India. *Discover Environment*, 3(1), 232. <https://doi.org/10.1007/s44274-025-00438-w>
- Duke University. (2002). *STA102: Correlation and regression – The coefficient of determination*. Department of Statistical Science, Duke University.
- Jannoura, R., Brinkmann, K., Uteau, D., Bruns, C., & Joergensen, R. G. (2015). Monitoring of crop biomass using true colour aerial photographs taken from a remote controlled hexacopter. *Biosystems Engineering*, 129, 341-351. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.11.007>
- Franco, E., Ghisi, E., Vaz, I. C. M., & Thives, L. P. (2025). Permeable Pavements: An Integrative Review of Technical and Environmental Contributions to Sustainable Cities. *Water*, 17(22), 3323. <https://doi.org/10.3390/w17223323>
- Gutiérrez Boneo, M. M. (10 de junio de 2025). *El cuidado de áreas verdes: Clave para el bienestar ambiental*. Gaceta UABC. Universidad Autónoma de Baja California. <https://gaceta.uabc.mx/el-cuidado-de-areas-verdes-clave-para-el-bienestar-ambiental>
- Garzón, J., Molina Sánchez, I., & Jiménez Cleves, G. (2024). Evaluación del fenómeno de la isla de calor urbano en Cartago, Colombia: tendencias de factores ambientales en los últimos 20 años. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI*. <https://doi.org/10.26507/paper.3712>
- Heras, A. (8 de agosto de 2025). *Mexicali, BC, rompe récord de temperatura con 52.7 grados Celsius*. La Jornada. <https://www.jornada.com.mx/noticia/2025/08/08/estados/mexicali-bc-rompe-record-de-temperatura-con-527-grados-celsius>
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32(1), 1-6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>
- Krishnan, P., Meyers, T. P., Hook, S. J., Heuer, M., Senn, D., & Dumas, E. J. (2020). Intercomparison of in situ sensors for ground-based land surface temperature measurements. *Sensors*, 20(18), 5268. <https://doi.org/10.3390/s20185268>
- Lau, T.-K., & Hsu, H.-C. (2025). Urban Heat Island Effect and Unequal Temperature-Related News Attention in Taiwan's Major Cities. *Urban Science*, 9(10), 417. <https://doi.org/10.3390/urbansci9100417>
- Lee, S., & Yu, B.-H. (2019). Automatic detection of dead tree from UAV imagery. *Coordinates*, 15(4), 36-39. <https://mycoordinates.org/pdf/apr19.pdf>
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2005). *Geographical information systems and science*. John Wiley & Sons.
- Macedo, F. L., Nóbrega, H., de Freitas, J. G., & Pinheiro de Carvalho, M. A. A. (2025). Assessment of vegetation indices derived from UAV imagery for weed detection in vineyards. *Remote Sensing*, 17(11), 1899. <https://doi.org/10.3390/rs17111899>
- Mandjouda, L. K., Behera, P., Roman, K. K., Azam, H., & Denis, M. (2025). Street-Level Sensing for Assessing Urban Microclimate (UMC) and Urban Heat Island (UHI) Effects on Air Quality. *Environments*, 12(6), 184. <https://doi.org/10.3390/environments12060184>
- Ohlert, P. L., Bach, M., & Breuer, L. (2023). Accuracy assessment of inverse distance weighting interpolation of groundwater nitrate concentrations in Bavaria (Germany). *Environmental Science and Pollution Research*, 30(4), 9445-9455. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22670-0>
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1-24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- Rahimi, E., Dong, P., & Jung, C. (2025). Global NDVI-LST correlation: Temporal and spatial patterns from 2000 to 2024. *Environments*, 12(2), 67. <https://doi.org/10.3390/environments12020067>
- Rony, M. K. K., & Alamgir, H. M. (2023). High temperatures on mental health: Recognizing the association and the need for proactive strategies—A perspective. *Health Science Reports*, 6(12), e1729. <https://doi.org/10.1002/hsr2.1729>
- Schwarz, N., Schlink, U., Franck, U., & Großmann, K. (2012). Relationship of land surface and air temperatures and its implications for quantifying urban heat island indicators—An application for the city of Leipzig (Germany). *Ecological indicators*, 18, 693-704. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.01.001>
- Shashua-Bar, L., & Hoffman, M. E. (2000). Vegetation as a climatic component in the design of an urban street: An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. *Energy Buildings* 31(3), 221-235. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(99\)00018-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(99)00018-3)
- Speak, A. (2015). 12-Influence of vegetation damage on urban cooling effects in F. Pacheco-Torgal, J.A. Labrincha, L.F. Cabeza, C.-G. Granqvist (Eds.), *Eco-Efficient Materials for Mitigating Building Cooling Needs* (pp. 325-347). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-380-5.00012-1>

Stamford, J. D., Viallet-Chabrand, S., Cameron, I., & Lawson, T. (2023). Development of an accurate low cost NDVI imaging system for assessing plant health. *Plant Methods*, 19(1), 9. <https://doi.org/10.1186/s13007-023-00981-8>

Stewart, I. D. (2011). A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *International Journal of Climatology*, 31(2), 200–217. <https://doi.org/10.1002/joc.2141>

United Nations. (16 de mayo de 2018). *2018 Revision of World Urbanization Prospects*. United Nations, Department of Economic and Social Affairs. <https://www.un.org/en/desa/2018-revision-world-urbanization-prospects>

Valavanidis, A. (2024). *Half of the Global Population Lives in MegaCities. Megacities are hotspots for slums, GHG emissions, toxic air pollution, climate change, deteriorating water and soil quality*. https://www.researchgate.net/publication/379655450_Half_of_the_Global_Population_Lives_in_MegaCities_Megacities_are_hotspots_for_slums_GHG_emissions_toxic_air_pollution_climate_change_deteriorating_water_and_soil_quality

Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370-384. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)

Wu, B., Zhang, Y., Wang, Y., He, Y., Wang, J., Wu, Y., Lin, X., & Wu, S. (2024). Mitigation of urban heat island in China (2000–2020) through vegetation-induced cooling. *Sustainable Cities and Society*, 112, 105599. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105599>

Yahia, M. W., & Johansson, E. (2014). Landscape interventions in improving thermal comfort in the hot dry city of Damascus, Syria—The example of residential spaces with detached buildings. *Landscape and Urban Planning*, 125, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.01.014>

Yang, J., Ren, J., Sun, D., Xiao, X., Xia, J. C., Jin, C., & Li, X. (2021). Understanding land surface temperature impact factors based on local climate zones. *Sustainable Cities and Society*, 69, 102818. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102818>

Yin, Y., Li, S., Xing, X., Zhou, X., Kang, Y., Hu, Q., & Li, Y. (2024). Cooling benefits of urban tree canopy: A systematic review. *Sustainability*, 16(12), 4955. <https://doi.org/10.3390/su16124955>

Zhao, J., Lu, J., Ge, J., Fan, Y., Wang, H., Gu, M., Xue, Y., Zhao, Y., Lv, G., Lin, H., Zhao, K., & Luo, X. (2025). Influences of permeable pavements with different hydraulic properties on evaporative cooling and outdoor thermal environment: Field experiments. *Building and Environment*, 270, 112525. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112525>

