

Relación entre la cobertura vegetal y la variación de la temperatura superficial del 2014 al 2024 en Xalapa, Veracruz

Relationship between vegetation cover and surface temperature variation from 2014 to 2024 in Xalapa, Veracruz

Marisol Carmona-Ortega ^a | Irving Uriel Hernández-Gómez ^{b*}
María Ramírez -Salazar ^c

Recibido: 7 de agosto de 2025.

Aceptado: 22 de enero de 2026.

^a Observatorio de Procesos Territoriales y Paisajes (OPTH), Universidad Veracruzana. Xalapa, México.
Contacto: zS24019488@estudiantes.uv.mx | ORCID: [0000-0003-1611-3176](https://orcid.org/0000-0003-1611-3176)

^b Observatorio de Procesos Territoriales y Paisajes (OPTH), Universidad Veracruzana. Xalapa, México.
Contacto: irvhernandez@uv.mx | ORCID: [0000-0002-0051-3071](https://orcid.org/0000-0002-0051-3071) *Autor para correspondencia.

^c Observatorio de Procesos Territoriales y Paisajes (OPTH). Universidad Veracruzana. Xalapa, México.
Contacto: mariamirez@uv.mx | ORCID: [0000-0001-9122-5122](https://orcid.org/0000-0001-9122-5122)

Cómo citar:

Carmona-Ortega, M., Hernández-Gómez, I. U. Y Ramírez -Salazar, M. (2026). Relación entre la cobertura vegetal y la variación de la temperatura superficial del 2014 al 2024 en Xalapa, Veracruz. *UVserva*, (21), 17-35. <https://doi.org/10.25009/uvs.vi21.3160>

Resumen: El crecimiento urbano acelerado, la inadecuada planificación y la poca importancia que se le da a la cobertura vegetal, han provocado alteraciones en los servicios ambientales que ésta aporta al ser humano. En la ciudad de Xalapa se tiene registro del incremento de isla de calor localizado del centro de la ciudad hacia la periferia sobre todo en las zonas donde el crecimiento urbano ha desprovisto de vegetación, la cual contribuye en la regulación térmica y la mitigación de riesgos de deslizamiento. El presente trabajo tiene como objetivo identificar las relaciones espaciales entre la cobertura vegetal y los valores de temperatura de la superficie a lo largo de una década (2014 - 2024), utilizando imágenes satelitales Landsat 8 y 9. Los resultados estadísticos mostraron correlaciones inversas significativas, lo que indica que a mayor densidad y vigorosidad de vegetación (mayores valores en el índice de vegetación de diferencia normalizada) las temperaturas superficiales tienden a ser más bajas.

Palabras clave: Cobertura vegetal; islas de calor urbano; NDVI; LST; crecimiento urbano.

Abstract: Accelerated urban growth, inadequate planning, and the inappropriate importance to vegetation cover have led to alterations in the ecosystem services it provides to humans. In the city of Xalapa, an increase in localized urban heat island effects has been recorded, extending from the city center toward the periphery, particularly in areas where urban expansion has reduced vegetation cover. Vegetation plays a key role in thermal regulation and in mitigating risks such as landslides. The objective of this study is identify the spatial relationships between vegetation cover and land surface temperature over a decade (2014–2024), using Landsat 8 and 9 satellite imagery. Statistical results revealed significant inverse correlations, indicating that higher vegetation density and vigor (as reflected by higher values of the Normalized Difference Vegetation Index) are associated with lower surface temperatures.

Keywords: Vegetation cover; urban heat islands; NDVI; LST; urban growth.

Introducción

La urbanización acelerada y la expansión no planificada de las ciudades están disminuyendo las áreas verdes urbanas y periurbanas (De Lima *et al.*, 2023). Por ello, al privilegiar los cambios de uso del suelo, se afecta la dinámica del sistema físico - natural, lo que a su vez altera la provisión de servicios ambientales que ofrece la vegetación (Hanna *et al.*, 2023). Morales-Cerdas *et al.* (2018) documentaron la influencia favorable de la vegetación y sus efectos para el amortiguamiento y la mitigación de algunos de los problemas ambientales relacionados con el descontrolado crecimiento urbano como la regulación de la temperatura.

Los espacios urbanos año con año han ido desplazando a la vegetación natural o local, alterando al mismo tiempo el clima y la temperatura de la superficie urbana

(Zavaleta-Palacios *et al.*, 2020). Este fenómeno conocido como Isla de calor urbano (ICU) se caracteriza por la transformación del balance de radiación y el contenido de calor en las áreas urbanizadas, alterando la presión atmosférica, los vientos, la nubosidad y la precipitación, así como en la distribución de los contaminantes y la ocurrencia de eventos climáticos extremos (Barrera *et al.*, 2022).

Para atender los desafíos de las ciudades, es necesario generar indicadores ambientales que analicen la cubierta vegetal, la cual funge como reguladora del clima y su relación con el crecimiento urbano. Diversos estudios han demostrado que las áreas urbanas con vegetación, como árboles y pasto, pueden registrar temperaturas de 2 a 4 veces más bajas en comparación con áreas urbanas sin vegetación.

Esta reducción de temperatura se debe a varios factores, como la sombra que proporcionan los árboles y el efecto de enfriamiento por evapotranspiración de las plantas, además de que el follaje modifica el flujo del aire circundante (Schwaab *et al.*, 2021; Camacho-Sandoval *et al.*, 2024).

Actualmente se hace uso de las nuevas tecnologías informáticas como la teledetección, para evaluar variables climáticas a través de sensores remotos (imágenes de satélite o drones) con sus distintas bandas espectrales como las térmicas e infrarrojas, con estas bandas se analiza la distribución espacial de la Temperatura Superficial de la Tierra (*LST* por sus siglas en inglés).

Para este estudio *LST* se entiende como la energía térmica que se emite del suelo, techos, pavimentos, vegetación u otras coberturas de la superficie terrestre y sus cambios a lo largo del tiempo (Li *et al.*, 2025). Es decir, mediante este tipo de imágenes se puede conocer la variación térmica que generan por ejemplo la irradiación del concreto, suelos con o sin cobertura, así como el efecto de la vegetación como islas de enfriamiento en el interior de la ciudad (Barrera *et al.*, 2022).

De las múltiples funciones que realiza la vegetación, la regulación del clima es de las más importantes ya que incide favorablemente en el confort y el bienestar de la población citadina (Jáuregui, 1993, 2010; Oke *et al.*, 1999; Grimm *et al.*, 2008).

En este sentido, el presente estudio tiene como objetivo identificar las relaciones espaciales entre la cobertura vegetal y los valores de temperatura a lo largo de una década (2014 - 2024) en la ciudad de Xalapa, Veracruz, utilizando imágenes satelitales Landsat 8 y 9 para generar índices de vegetación (*NDVI*) y datos térmicos (bandas 10 y 11).

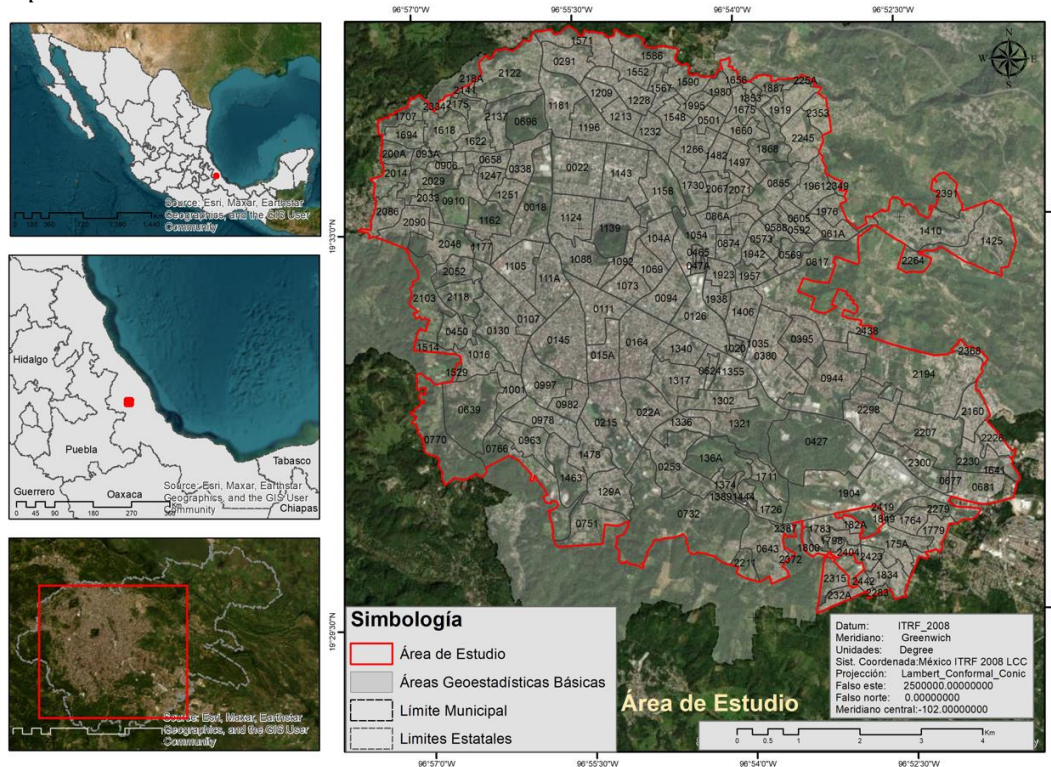
1. Área de estudio

Xalapa es la ciudad capital; se ubica en la porción central de la entidad veracruzana y conforma su zona metropolitana y colindancia con los municipios de Banderilla, Jilotepec y Naolinco, al norte; Emiliano Zapata, al este; Coatepec, al sur y San Andrés Tlaxelhuayocan al oeste (**Figura 1**).

Está asentada sobre lomeríos de laderas bajas en las estribaciones de la vertiente oriental del Cofre de Perote, entre los 700 y 1 600 msnm. El suelo derivado de rocas volcánicas: basalto, andesita y productos piroclásticos, en su mayoría subyace a construcciones de cemento y pavimentos, expresión del desarrollo urbano de la capital;

lo cual, a su vez, ha trastocado la capacidad de infiltración natural y los niveles de reflectancia del suelo, importante para mitigar la ICU.

Figura 1
Mapa de localización del área de estudio



Fuente: Elaboración propia con datos vectoriales (INEGI, 2024).

Por su ubicación en la vertiente oriental, Xalapa mantiene un clima semicálido húmedo propio de variaciones térmicas entre 8°C y 28°C; no obstante, el crecimiento urbano ha creado condiciones climáticas extremas, con registro de temperaturas superiores a 35°C específicamente en la temporada de sequía (Camarillo, 2017; Chong, 2024).

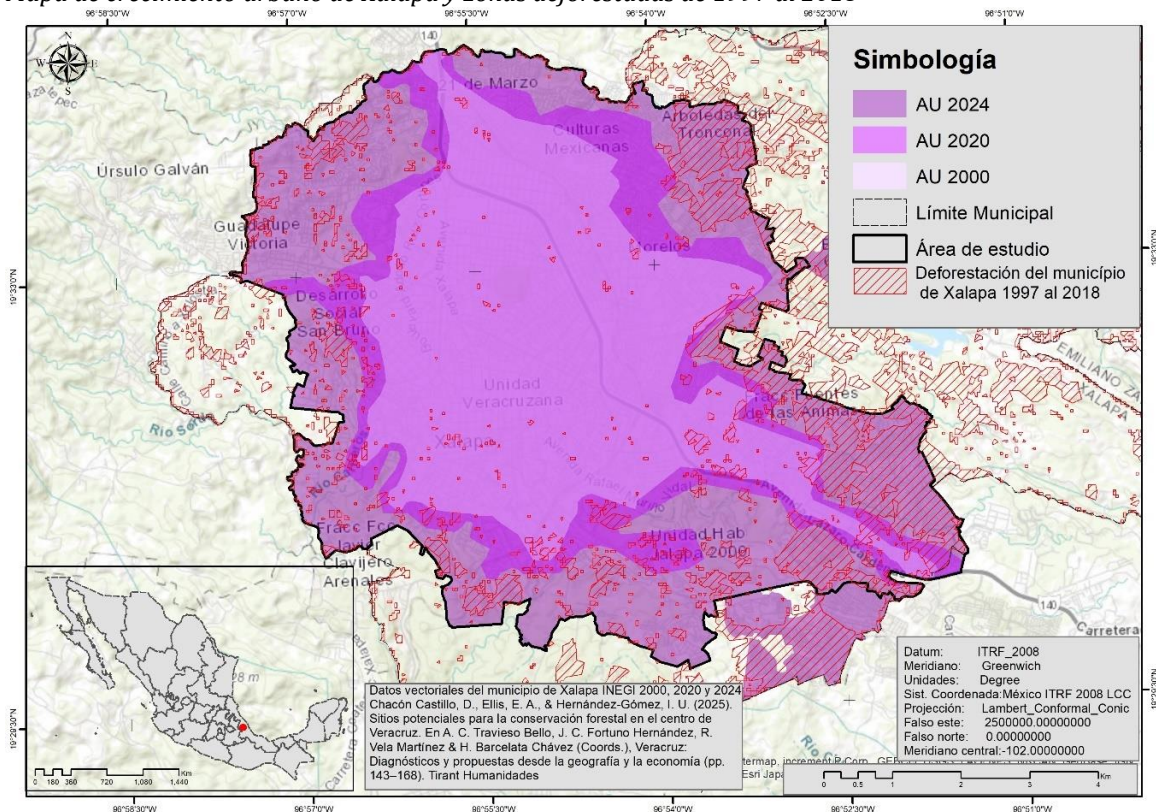
La humedad característica de este clima supone lluvia en la mayor parte del año y nieblas que asociadas a la vegetación arbórea, funcionan como “cosechadoras de lluvia”; ambos fenómenos se han reducido considerablemente en el ciclo anual e intensificado la lluvia, con la influencia de depresiones tropicales y huracanes (Parada y Cervantes, 2017; Vargas *et al.*, 2024).

Al mismo tiempo, la cubierta vegetal se ha visto mermada por la urbanización descontrolada. Por ejemplo, Chacón-Castillo *et al.* (2025) mencionan que en 21 años (1997-2018) la deforestación fue de 12,082 ha (tasa de 0.24% anual), en los municipios de Xalapa, Coatepec y Emiliano Zapata. Además, con la información vectorial, se estimó la superficie urbana, obteniendo que para el 2000 se tenían 2 582 ha. Para el 2020 3 562 ha; y para el 2024 6 403 ha, casi triplicándose superficialmente el área urbana en 24 años (**Figura 2**).

El proceso de crecimiento urbano afecta a la cobertura vegetal de la ciudad. El bosque mesófilo de montaña que fue la comunidad de vegetación dominante en esta región, actualmente está degradada por la expansión urbana, y la metropolización, estos procesos impulsados por una demanda de suelo para fines habitacionales y la creciente interconexión económica y social entre la capital y los municipios circundantes, lo que conlleva a la transformación del uso del suelo alterando al mismo tiempo la sensación térmica en la ciudad y sus zonas conurbadas (Chong, 2024; Chacón-Castillo *et al.*, 2025).

Figura 2

Mapa de crecimiento urbano de Xalapa y zonas deforestadas de 1997 al 2018



Fuente: Chacón-Castillo *et al.* (2025).

En Xalapa se han aplicado herramientas digitales para monitoreo multitemporal de la vegetación tanto en su cobertura, estructura y calidad, con indicadores como *NDVI*, *FRAGSTATS*, entre otros (Lemoine-Rodríguez *et al.*, 2019; Chacón-Castillo *et al.*, 2025), documentando de manera eficiente la reducción de la cobertura vegetal. Sin embargo, no se han realizado aplicaciones comparando *NDVI* con *LST*.

2. Metodología

El procesamiento y análisis se llevaron a cabo en el entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG) QGIS 3.28, herramientas de teledetección espacial que han mostrado

eficiencia para el manejo de información, análisis y modelación de fenómenos ambientales (Quattrochi y Luvall, 2004); para ello se utilizaron imágenes satelitales Landsat 8/9 de nivel 2 (Collection 2–Level 2) con una resolución de 30 metros por píxel, del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS - <https://glovis.usgs.gov/app>), para obtener la Temperatura de la Superficie Terrestre (*LST*) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (*NDVI*) del 2014 al 2024. Se emplearon específicamente las bandas térmicas procesadas (ST_TRAD, ST_EMIS, ST_QA), que contienen información sobre la temperatura de brillo, la emisividad de la superficie y la calidad de los píxeles, respectivamente.

Para ubicar espacialmente las correlaciones entre los valores de *NDVI* y *LST* se utilizaron las unidades geográficas Área Geoestadística Básica (AGEB), delimitaciones que agrupan entre 25 y 50 manzanas del Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI (2014; 2024). A las AGEB se le integraron los valores estadísticos: media, mínima, máxima y rango. La **Tabla 1**, muestra las fechas utilizadas, cabe resaltar que no se elaboraron promedios anuales ya que se priorizó en el uso de imágenes con baja nubosidad, condición idónea y confiable para los análisis sobre *NDVI* y *LST* (Jiménez-Muñoz *et al.*, 2014). Además, se procuró el uso de imágenes satelitales de la temporada de sequía (febrero-junio) que es cuando se tiene mayores temperaturas; sin embargo, debido a la disponibilidad de imágenes con baja nubosidad, para dos años, se utilizaron imágenes de los meses de julio y septiembre.

Tabla 1
Imágenes satelitales y fechas utilizadas para los cálculos de NDVI y LST

Imagen	Fecha
Landsat 8	14 de abril 2014
	8 de septiembre 2015
	8 de julio 2016
	24 de mayo 2017
	27 de mayo 2018
	15 de junio 2019
	16 de mayo 2020
	19 de mayo 2021
Landsat 9	27 de marzo 2022
	1 de mayo 2023
	4 de junio 2024

Fuente: elaboración propia.

Para garantizar la confiabilidad de los datos térmicos, es decir, la calidad de los píxeles (presencia de nubes, sombras, saturación) en la banda ST_QA.TIF se identificaron los valores de QA que indican condiciones óptimas (por ejemplo, QA = 0) y se aplicó una máscara a la imagen de *LST* para excluir áreas afectadas por nubes o errores radiométricos (LST_C_MASKED.TIF). Para terminar la preparación de los datos, se aplicó una corrección por emisividad terrestre.

La banda ST_EMIS.TIF, que contiene la emisividad codificada en formato entero, fue reescalada aplicando un factor (0.0001) y posteriormente, se empleó la fórmula corregida para el cálculo de *LST*:

$$EMIS = ST_EMIS \times 0.0001$$

$$LST (^{\circ}C) = [T / (1 + (\lambda \times T / \rho) \times \ln(\epsilon))] - 273.15$$

Donde:

- T es la temperatura en grados Kelvin (calculada como $ST_TRAD \times 0.00341802$).
- $\lambda=10.8\mu\text{m}$ (longitud de onda del canal térmico de Landsat 8/9).
- $\rho=14388\mu\text{m}\cdot\text{K}$ (constante de Planck).
- ϵ es la emisividad superficial reescalada.

Este proceso permite ajustar las variaciones térmicas relacionadas con el tipo de cobertura terrestre. Mientras que el cálculo de *NDVI* se realizó mediante la fórmula (Hernández-Gómez *et al.*, 2020):

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$

$$NDVI = (B5 - B4) / (B5 + B4)$$

Donde:

- B5 representa la reflectancia del infrarrojo cercano (NIR)
- B4 representa la reflectancia del espectro rojo (RED)

2.1. Normalización y tipo de datos

El resultado del índice se almacenó en formato Float32, lo que permite representar adecuadamente el rango del *NDVI* (-1.0 a +1.0). Los valores se interpretan de la siguiente forma (Yengoh *et al.*, 2015):

- $NDVI < 0$: Agua, nubes, sombra.
- $NDVI$ entre 0 y 0.2: Suelos desnudos o rocas.
- $NDVI$ entre 0.2 y 0.5: Vegetación escasa o pastizales.
- $NDVI > 0.5$: Alta cobertura vegetal (bosques, cultivos densos).

Posteriormente, mediante el análisis estadístico y las fórmulas de la **Tabla 2** se realizó un modelo de regresión lineal simple (Pan *et al.*, 2019) específicamente para el año 2014 y 2024, utilizando como variable dependiente la temperatura superficial terrestre (*LST*) promedio y como variable independiente el *NDVI* promedio por AGEB (INEGI, 2014; 2024).

Tabla 2

Datos para el modelo de regresión lineal simple entre NDVI y LST para los años de comparación

	2014	2024
Fórmula o ecuación del modelo	$\widehat{LST} = 39.30 - 15.49 \cdot NDVI$	$\widehat{LST} = 43.41 - 21.30 \cdot NDVI$
Donde:	\widehat{LST} : Temperatura superficial terrestre estimada (°C)	
Variables utilizadas	NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (valor entre 0 y 1)	
	- LST_mean: Temperatura media superficial (°C)	
	- NDVI_mean: Promedio del índice NDVI	
	- LST_range: Diferencia entre temperatura máxima y mínima	

Fuente: Elaboración propia.

Los datos se integraron en un solo archivo que contiene para cada AGEB, los valores estadísticos de ambas variables: media, mínima, máxima y rango, de acuerdo con la siguiente clasificación (**Tabla 3**).

Tabla 3

Clasificación de variables y esquema de interpretación del modelo de regresión lineal simple entre NDVI y LST para los años de comparación

	temperatura media (LST_mean)	NDVI promedio (NDVI_mean)
Clasificación de variables	Baja: LST_mean ≤ 40 Media: 40 < LST_mean ≤ 41 Alta: LST_mean > 41	Bajo: NDVI_mean ≤ 0.10 Medio: 0.10 < NDVI_mean ≤ 0.16 Alto: NDVI_mean > 0.16
Fórmula	Si LST_mean ≤ 40 entonces "Baja" Si 40 < LST_mean ≤ 41 entonces "Media" Si LST_mean > 41 entonces "Alta"	Si NDVI_mean ≤ 0.10 entonces "Bajo" Si 0.10 < NDVI_mean ≤ 0.16 entonces "Medio" Si NDVI_mean > 0.16 entonces "Alto"
Combinación de categorías: correlación LST-NDVI	correlación = clasificación de temperatura + "-" + clasificación de NDVI	
Agrupación	Zona crítica por calor: Alta-Bajo, Alta-Medio Zona de transición: Media-Bajo, Media-Medio, Media-Alto, Baja-Bajo Zona termorregulada: Baja-Medio, Baja-Alto	
Fórmula de agrupación	Si correlación ∈ {Alta-Bajo, Alta-Medio} → Zona crítica por calor Si correlación ∈ {Media-Bajo, Media-Medio, Media-Alto, Baja-Bajo} → Zona de transición Si correlación ∈ {Baja-Medio, Baja-Alto} → Zona termorregulada	
Simbología cartográfica	Zona crítica por calor: Rojo Zona de transición: Amarillo Zona termorregulada: Verde	

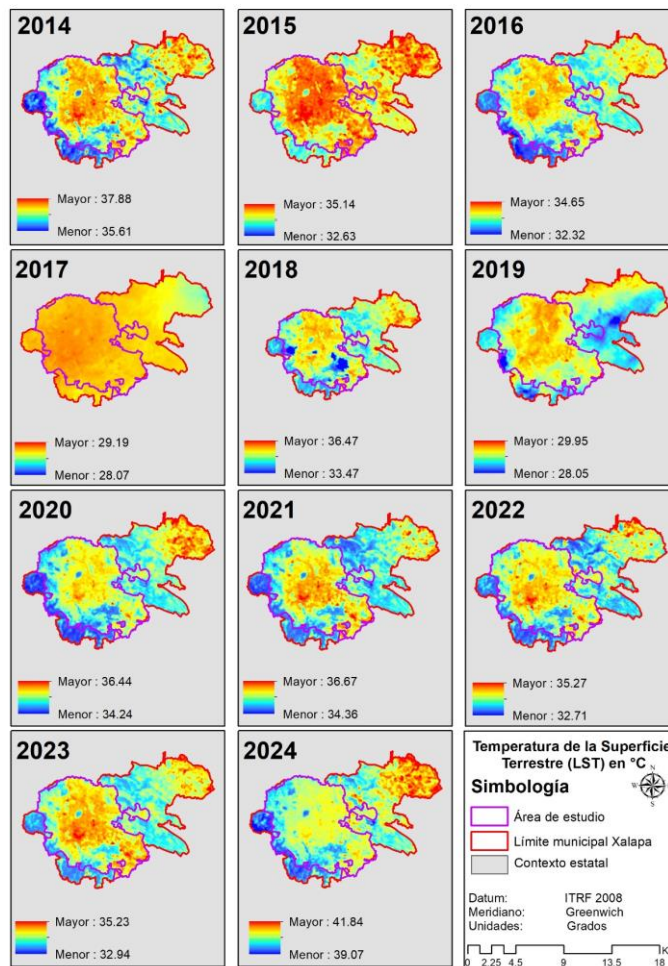
Fuente: Elaboración propia.

La variable llamada "correlación LST-NDVI" combina ambas clasificaciones para representar su relación espacial a través de mapas.

3. Resultados

En relación con la temperatura de la superficie, en la **Figura 3** se muestra la secuencia de los valores de *LST* para la zona urbana de la ciudad de Xalapa, Veracruz, durante el periodo 2014–2024. A partir del análisis realizado se observa una variabilidad térmica, ya que en el 2017 y 2019 se registraron las temperaturas promedio más bajas 28.61°C y 29.01°C respectivamente, valores que contrastan de manera amplia, con los datos obtenidos en el 2024 con 40.53°C en promedio. En general, los años posteriores al 2017 se mantuvieron con temperaturas promedio de entre 33°C y 36°C.

Figura 3
 Representación espacial de la *LST* en el municipio de Xalapa, periodo: 2014-2024

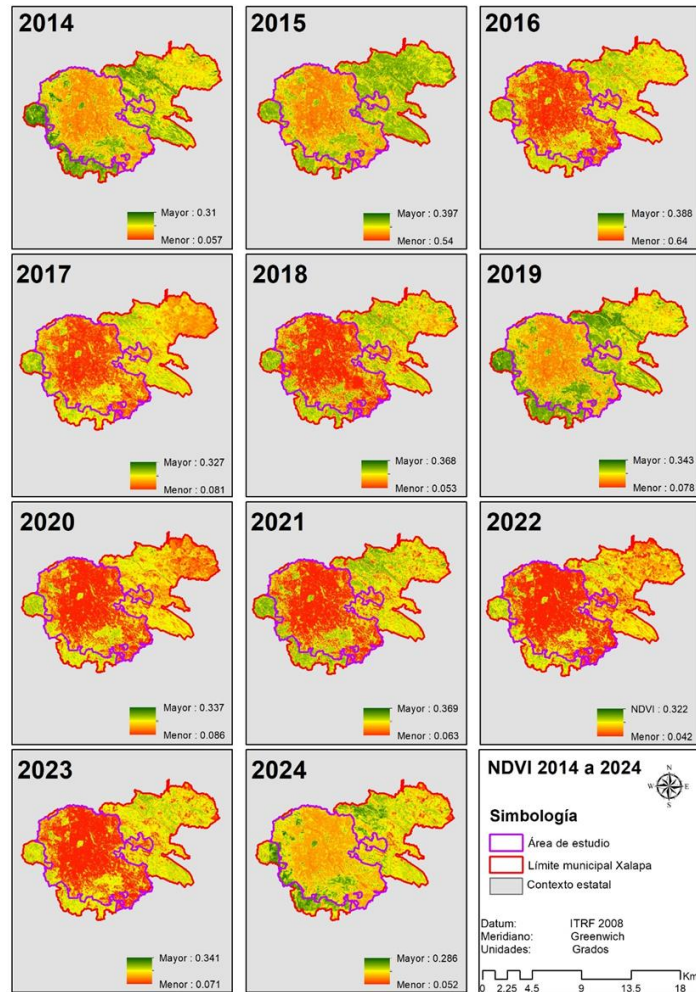


Fuente: Elaboración propia con base en imágenes de satélite Landsat 8 y 9, y datos vectoriales de INEGI, 2024.

Dos aspectos a destacar es la dominancia de valores más bajos de *LST* localizados en las porciones sur y oeste de la ciudad, sitios que están regulados con espacios que cuentan con mayor superficie cubierta por relictos de vegetación arbórea, en tanto que hacia la porción oriente y norte de la ciudad los valores de *LST* no son tan bajas, toda

vez, que las comunidades arbóreas cubren menores superficies. De igual manera, resalta la representación de valores de *LST* bajos a medios asociados a alineaciones de arterias vehiculares arboladas como la Avenida Xalapa y el circuito de los lagos-zona universitaria.

Figura 4
Representación espacial del NDVI en el municipio de Xalapa:
periodo: 2014-2024



Fuente: Elaboración propia con base en imágenes de satélite Landsat 8 y 9, y datos vectoriales de INEGI, 2024.

Para el caso del *NDVI*, la **Figura 4** muestra los modelos de evolución del índice *NDVI* para los años 2014 al 2024. Durante este periodo se identifican fluctuaciones de este índice en la cobertura vegetal de la ciudad. Por ejemplo, en el 2015 y 2016 se registraron los valores más altos en promedio de *NDVI* con 0.19 cada año, a diferencia del 2024 donde se muestran los valores más bajos para el periodo con 0.134 en promedio, lo que podría inferirse como una reducción en la cobertura vegetal.

Asimismo, los valores mínimos anuales fueron relativamente bajos durante todo el periodo con una disminución marcada en el 2022 con 0.042.

Los valores con mayor registro son para los años 2015 y 2016 con 0.39 y 0.38 respectivamente, sin embargo, en todo el periodo los valores máximos se mantienen en un rango entre 0.34 a 0.36, que, tomando en cuenta la escala de López-Pérez *et al.* (2015) y considerando el promedio para la categorización, la ciudad de Xalapa Veracruz tiene una vegetación poco vigorosa y escasa.

Tabla 4

Coefficientes del modelo de regresión lineal entre NDVI y LST para el año 2014

Parámetro	Estimación	Error estándar	Valor t	Valor p	Significancia
Intercepto	39.29	0.0843	466.1	< 2e-16	***
NDVI_mean	-15.49	0.5041	-30.7	< 2e-16	***

Fuente: Elaboración propia.

La misma variabilidad se muestra en las áreas de Xalapa, cuyos valores reflejan vegetación poco vigorosa, no obstante, resaltan los años 2016, 2017, 2022 y 2023, en los que se muestran valores más bajos, lo cual supone mayor deterioro en la calidad de la vegetación o en su caso periodos amplios de poca precipitación.

Tabla 5

Indicadores de ajuste y significancia del modelo de regresión para el 2014

Estadístico	Valor
Error estándar residual	0.376
Grados de libertad residuales	180
R ² (R-squared)	0.8399
R ² ajustado	0.8390
Estadístico F	944.4
Grados de libertad del modelo	1 y 180
Valor p del modelo	< 2.2e-16

Fuente: elaboración propia.

Los análisis estadísticos de los modelos de regresión lineal para determinar la correlación espacial del NDVI y la LST, permitieron identificar patrones térmicos diferenciados dentro de la mancha urbana de Xalapa.

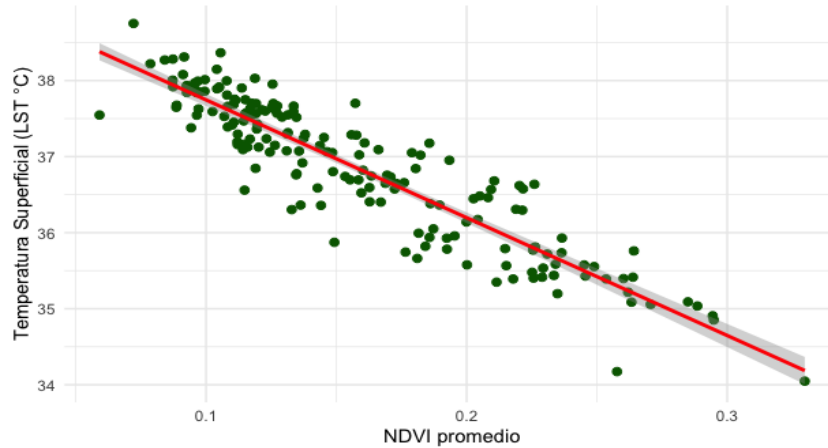
En el modelo del 2014 se encontró una correlación estadísticamente significativa ($p < 0.001$), con un coeficiente de determinación ajustado de $R^2 = 0.84$, lo que indica que el modelo explica el 84% de la variación observada en la temperatura superficial. Es decir, el coeficiente de regresión para el NDVI fue de -15.49, lo cual reafirma la existencia de una relación inversa: donde a mayor densidad de vegetación, menor es el valor que se registra de la temperatura superficial (**Tabla 4**).

La desviación estándar de los residuos fue de 0.376 °C, indicando una alta precisión del modelo. Comparado con el año 2024, el modelo de 2014 muestra una mayor capacidad explicativa y menor error, aunque el efecto estimado del NDVI sobre la LST fue menos intenso **Tabla 5**.

La **Figura 5** presenta un gráfico de dispersión que muestra la relación entre el NDVI promedio y la LST promedio por AGEB para el año 2014 en la ciudad de Xalapa. Cada punto representa un AGEB, y la línea roja corresponde al modelo de regresión

lineal ajustado, acompañada de su respectivo intervalo de confianza al 95% (banda gris).

Figura 5
 Relación entre NDVI y LST para el año 2014 en la ciudad de Xalapa



Fuente: Elaboración propia.

Además, la **Figura 5** muestra que el patrón de dispersión revela una fuerte relación negativa entre las variables, es decir, conforme aumenta el *NDVI* la temperatura superficial disminuye. La distribución de los puntos está muy alineada con la recta de regresión, lo que sugiere una alta capacidad predictiva del modelo, respaldada por un coeficiente de determinación elevado ($R^2 = 0.839$).

Tabla 6
 Indicadores de ajuste y significancia del modelo de regresión para el 2024

Estadístico	Valor
Error estándar residual	0.641
Grados de libertad residuales	180
R^2 (R-squared)	0.7016
R^2 ajustado	0.6999
Estadístico F	423.2
Grados de libertad del modelo	1 y 180
Valor p del modelo	< 2.2e-16

Fuente: elaboración propia

Por su parte, el análisis de regresión para el año 2024, muestra como resultado que se tiene una correlación estadísticamente significativa ($p < 0.001$), con un coeficiente de determinación ajustado de $R^2 = 0.70$, lo que indica que el 70% de la variabilidad de la temperatura puede explicarse a partir del *NDVI* (**Tabla 6**). El error estándar de los residuos fue de aproximadamente 0.64 °C, lo que refleja una buena precisión del modelo.

En este caso, el coeficiente de regresión estimado para el *NDVI* fue de -21.29 (Tabla 7), lo cual sugiere una relación inversa: es decir, a mayor valor detectado de *NDVI*, menores valores registrados de temperatura superficial.

En la Figura 6 se muestra el gráfico de dispersión de la relación del *NDVI* promedio y la *LST* promedio por AGEB para el año 2024 en la ciudad de Xalapa. Cada punto representa un AGEB, y la línea roja corresponde al modelo de regresión lineal ajustado, acompañado de una banda gris que indica el intervalo de confianza del 95%, se observa una tendencia negativa, donde a mayor densidad de vegetación (mayores valores de *NDVI*), las temperaturas superficiales tienden a ser más bajas.

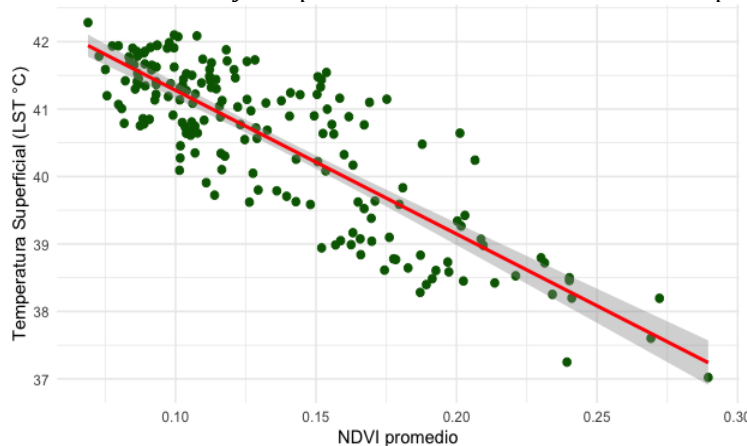
Tabla 7
 Coeficientes del modelo de regresión lineal entre *NDVI* y *LST* para el año 2024

Parámetro	Estimación	Error estándar	Valor t	Valor p	Significancia
Intercepto	43.4072	0.1473	294.69	< 2e-16	***
<i>NDVI</i> _mean	-21.2977	1.0352	-20.57	< 2e-16	***

Fuente: elaboración propia

El patrón de dispersión de la Figura 6 muestra que los AGEB con valores bajos de *NDVI* presentan temperaturas superiores a los 41 °C, mientras que aquellos con mayor vegetación presentan temperaturas por debajo de los 39 °C. Además, la inclinación pronunciada de la recta de regresión refuerza la conclusión estadística de que el *NDVI* tiene un efecto significativo sobre la temperatura superficial.

Figura 6
 Relación entre *NDVI* y *LST* para el año 2024 en la ciudad de Xalapa



Fuente: Elaboración propia.

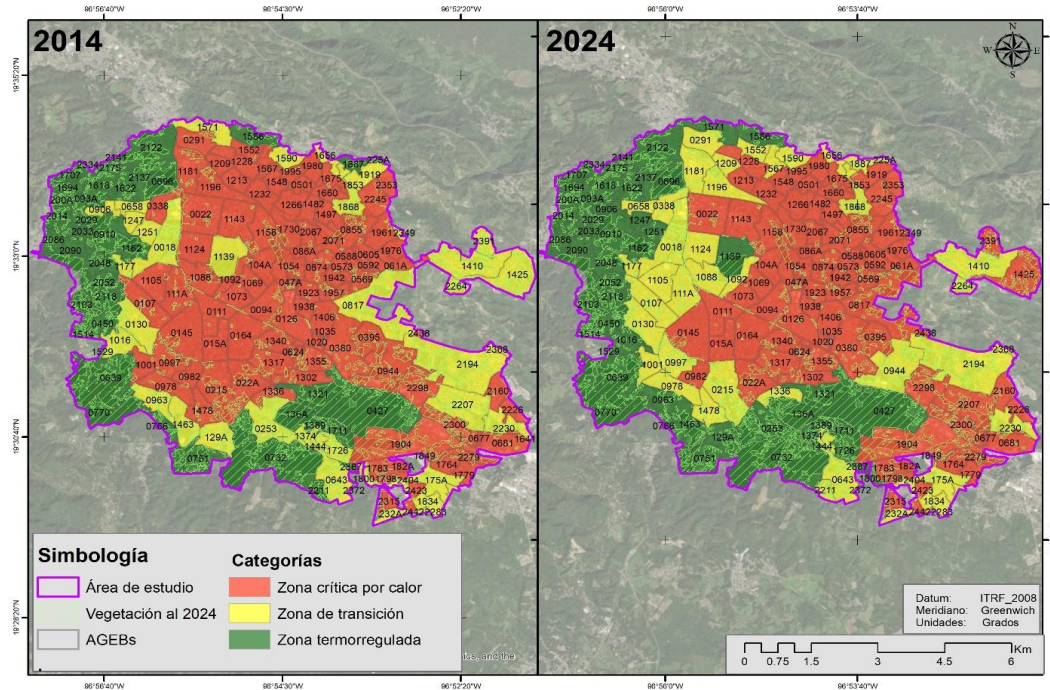
Por último, se cartografiaron las correlaciones categorizadas por AGEB's para que por conjunto de manzanas se pudieran representar tres categorías temáticas: zona crítica por calor, zona de transición y zona termorregulada, lo que permitió identificar patrones térmicos diferenciados dentro de la mancha urbana de Xalapa (Figura 7).

En la misma figura se muestra la comparación espacial entre 2014 y 2024, la cual evidencia la expansión de las zonas críticas por el aumento de la temperatura

dentro del área de estudio, particularmente hacia el centro y el oriente de la zona urbana, que en el 2014 aún eran áreas catalogadas como de transición.

Es de resaltar que, en el 2024, las zonas de color rojo se muestran con una mayor continuidad espacial. En contraste, las zonas termorreguladas del 2024 en color verde se mantienen hacia la periferia en la porción occidental. En cuanto a las zonas de transición color amarillo, estas funcionan como áreas intermedias que, con el tiempo y siguiendo los procesos históricos tienden a transformarse en zonas críticas, reflejando un proceso de urbanización progresiva que debilita los servicios de regulación térmica del paisaje.

Figura 7
Representación espacial de la relación entre NDVI y LST por AGEB en la ciudad de Xalapa



Fuente: Elaboración propia.

4. Discusión

El crecimiento urbano de Xalapa ha generado una fragmentación en los remanentes de la cobertura vegetal, el daño a la vegetación está asociado a la venta de lotes para vivienda y creación de nuevas vías de comunicación entre otros usos humanos, sin embargo, donde se aprecia más el daño a la cobertura vegetal es en la periferia, lo que ha provocado a su vez cambios en la sensación térmica como se ha documentado en otros estudios (Benítez, 2011; Seto *et al.*, 2012).

En estos resultados se evidencia una relación inversa significativa entre el *NDVI* y *LST*, lo que confirma que a mayores valores de *NDVI* menores temperaturas superficiales, ya que la cobertura vegetal funge como termorregulador de las zonas

urbanas mediante mecanismos de sombra, evapotranspiración y reguladora de humedad (Bowler *et al.*, 2010; Zhou *et al.*, 2014).

La relación encontrada entre el *NDVI* y *LST* en Xalapa coincide con la reportada por otros estudios y ciudades de América Latina. Por ejemplo, Sancho-Zurita *et al.* (2025) reportó correlaciones inversas significativas entre las variables *NDVI* y *LST* ($r=-0.75$) en distintas áreas urbanas y periurbanas en Quito, Ecuador, destacando la función de la cobertura vegetal en la regulación de la temperatura superficial (Jin, 2012). Confirmando que la cobertura vegetal es uno de los factores que más ayudan en la regulación térmica urbana. El presente análisis, además, muestra que la pendiente pronunciada de la regresión (*NDVI - LST*) refuerza la significancia del efecto de la cobertura vegetal sobre la temperatura superficial.

En cuanto al análisis multitemporal este permitió identificar las diferencias entre los modelos aplicados para el 2014 y 2024. El modelo del 2014 sugiere que la cobertura vegetal tenía un papel termorregulador sobre la temperatura de las áreas urbanas. En contraste, para el 2024, el incremento de los valores de *LST* indica una intensificación del proceso de urbanización como lo refieren otros estudios donde se menciona que los cambios o incrementos estructurales del entorno urbano controlan la temperatura (Oke *et al.*, 1999; Stewart y Oke, 2012).

Continuando con la perspectiva espacial, se identificó que el incremento de la expansión de zonas con capacidad de termorregulación en algunas AGEBS, sugiere cambios positivos en la cobertura vegetal. Sin embargo, se identifican zonas térmicamente críticas principalmente en la zona centro del área urbana consolidando de esta manera el denominado efecto de isla de calor (ICU). Es de destacar que el Cerro del Macuiltepetl presenta valores de *LST* bajos respecto a sus colindancias, lo que confirma que áreas con cobertura vegetal densa funcionan como núcleo termorregulador, así lo mencionan Gillner *et al.* (2015) y Norton *et al.* (2014).

Se reconoce que este estudio puede tener limitaciones, específicamente en la resolución espacial de las imágenes satelitales y el uso del *NDVI* como variable para estimar la cobertura vegetal, así como las diferentes fechas de análisis debido a la nubosidad y la ausencia de otras variables atmosféricas, sin embargo, es un primer y preciso acercamiento a lo que ocurre en Xalapa. El principal aporte radica en la identificación y ubicación de los patrones térmicos urbanos y su evolución durante una década.

Por tal motivo, los resultados subrayan la necesidad de políticas de planificación urbana orientadas a la conservación, recuperación y distribución equitativa de la cobertura vegetal, no solo como estrategia ambiental, sino como un componente esencial para la mitigación del calor extremo en la ciudad, mejorando al mismo tiempo la calidad de vida de sus habitantes (Chacón-Castillo *et al.*, 2025).

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos mediante el análisis de regresión lineal simple para los años 2014 y 2024 muestran una relación estadísticamente significativa entre la cobertura vegetal (*NDVI*) y la temperatura superficial terrestre (*LST*) en los AGEBS de la ciudad de

Xalapa. Es de destacar que, para ambos años, se confirma la existencia de una relación inversa, es decir a mayor densidad de vegetación (valores de *NDVI*), menor registro de temperatura superficial.

Al mismo tiempo este estudio demuestra que la cobertura vegetal es un factor importante e influyente en la regulación térmica urbana y periurbana de Xalapa, Veracruz. Además, permitió identificar espacialmente la evolución de los patrones térmicos por AGEB en un periodo de 10 años (2014 - 2024), revelando que el oeste del área urbana se mantiene termorregulada mientras que, la parte centro - este de la ciudad son las que han sufrido cambios térmicos pasando de zonas en transición a zonas críticas por calor.

Por último, esta investigación hace énfasis en la complejidad de los factores que influyen en el cambio de la temperatura urbana, destacando la necesidad de enfoques integrales que consideren la interacción de la cobertura vegetal, con la estructura urbana y las dinámicas de uso de suelo. La identificación espacial de los cambios térmicos que se muestran en los mapas proporciona una base para orientar las intervenciones de recuperación / reforestación de arbolado urbano enfocadas a la mitigación del calentamiento superficial de la zona urbana y periurbana. Además, se aporta evidencia espacial, como herramienta de monitoreo térmico para la planificación territorial, orientada a la toma de acciones en materia de gestión ambiental y mejoramiento de la calidad de vida en Xalapa, Veracruz.

Referencias

- Barrera-Alarcón**, I. G., Caudillo Cos, C. A., Medina Fernández, S. L., Ávila Jiménez, F. G., y Montejano Escamilla, J. A. (2022). La isla de calor urbano superficial y su manifestación en la estructura urbana de la Ciudad de México. *Revista de Ciencias Tecnológicas*, 5(3), 312 - 330. <https://doi.org/10.37636/recit.v5n3e227>
- Benítez-Badillo**, G. (2011). Crecimiento de la población y expansión urbana de la ciudad de Xalapa, Veracruz y sus efectos sobre la vegetación y agroecosistemas (Tesis doctoral). *Colegio de Posgraduados, Campus Veracruz*. <https://tinyurl.com/5brdyshx>
- Bowler**, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., y Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147-155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>
- Camacho-Sandoval**, T., Magaña-Rueda, V. O., Ramos-De Robles, S. L., y Gran-Castro, J. A. (2024). La vegetación como reguladora del clima urbano: El caso del Área Metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México. *Investigaciones Geográficas*, 114(1-15). <https://doi.org/10.14350/rig.60849>
- Camarillo**, A. (2017). Temperatura en Xalapa alcanzó los 35.7 °C; la más alta fue de 42.7 °C en Soledad de Doblado. *Al Calor Político*. <https://tinyurl.com/ymvjm82k>
- Chacón Castillo**, D., Ellis, E. A., y Hernández-Gómez, I. U. (2025). Sitios potenciales para la conservación forestal en el centro de Veracruz. En A. C. Travieso-Bello, J. C. Fortuno-Hernández, R. Vela-Martínez y H. Barcelata-Chávez (Coords.), *Veracruz*.

- Diagnósticos y propuestas desde la geografía y la economía* (pp. 143–168). Tirant Humanidades.
- Chong** Garduño, M. C. (2024). La expansión de la zona metropolitana de Xalapa: Una revisión del tejido urbano de la zona sureste y sus condiciones de fragmentación y segregación espacial. En D. R. Martí-Capitanachi y A. Velázquez-Ruiz (Coords.), *Rasgos y métodos urbanos: Una mirada académica a la zona metropolitana de Xalapa* (pp. 17–56). Consejo Veracruzano de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico. <https://doi.org/10.52501/cc.247>
- De Lima**, G. N., Fonseca-Salazar, M. y Campo, J. (2023). Urban growth and loss of green spaces in the metropolitan areas of São Paulo and Mexico City: effects of land-cover changes on climate and water flow regulation. *Urban Ecosystems*, 26(6), 1739–1752. <https://doi.org/10.1007/s11252-023-01394-0>
- Gillner**, S., Vogt, J., Tharang, A., Dettmann, S., y Roloff, A. (2015). Role of street trees in mitigating effects of heat and drought at highly sealed urban sites. *Landscape and Urban Planning*, 143, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.06.005>
- Grimm**, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X., y Briggs, J. M. (2008). Global change and the ecology of cities. *Science*, 319(5864), 756–760. <https://doi.org/10.1126/science.1150195>
- Hanna**, E., Bruno, D., y Comín, F. A. (2023). The ecosystem services supplied by urban green infrastructure depend on their naturalness, functionality and imperviousness. *Urban Ecosystems*, 27(1), 187–202. <https://doi.org/10.1007/s11252-023-01442-9>
- Hernández-Gómez**, I., Vázquez-Luna, D., Cerdán-Cabrera, C., Navarro-Martínez, A., y Ellis, E. (2020). Mapping disturbance from selective logging in tropical forests of the Yucatán Peninsula, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23(1), 1-19. <http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.2952>
- INEGI**. (2024). Marco Geoestadístico: Polígonos en formato shapefile de las Área Geoestadística Básica (AGEB) Xalapa, Veracruz. INEGI. <https://tinyurl.com/3jx6y473>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)**. (2014). *Marco Geoestadístico: Polígonos en formato shapefile de las Área Geoestadística Básica (AGEB) Xalapa, Veracruz*. INEGI. <https://tinyurl.com/2p9ner78>
- Jáuregui-Ostos**, E. (1993). La isla de calor urbano de la ciudad de México a finales del siglo XIX. *Investigaciones Geográficas Boletín del Instituto de Geografía*, 1(26), 31-39. <https://doi.org/10.14350/rig.59016>
- Jáuregui-Ostos**, E. (2010). Las ondas de calor en la ciudad de México. *Investigaciones Geográficas*, (70), 71–76. <https://tinyurl.com/4vf73fru>
- Jiménez-Muñoz**, J. C., Sobrino, J. A., Skoković, D., Mattar, C., y Cristóbal, J. (2014). Land surface temperature retrieval methods from LANDSAT-8 Thermal Infrared Sensor data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(10), 1840–1843. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2312032>
- Jin**, M. S. (2012). Developing an Index to Measure Urban Heat Island Effect Using Satellite Land Skin Temperature and Land Cover Observations. *Journal of Climate*, 25(18), 6193-6201. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00509.1>

- Lemoine-Rodríguez, R., MacGregor-Fors, I. y Muñoz-Robles, C. (2019).** Six decades of urban green change in a neotropical city: A case study of Xalapa, Veracruz, Mexico. *Urban Ecosyst*, 22(3), 609–618. <https://doi.org/10.1007/s11252-019-00839-9>
- Li, Z., Tang, B., Wu, H., Zhao, W., Duan, S., Ren, H., y Gao, C. (2025).** Development and prospects of thermal infrared remote sensing. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(6), 1–22. <https://doi.org/10.11834/jrs.20254344>
- López-Pérez, A., Martínez-Menes, M. R., y Fernández-Reynoso, D. S. (2015).** Priorización de áreas de intervención mediante análisis morfométrico e índice de vegetación. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(1), 121–137. <https://tinyurl.com/5y8bsr5j>
- Morales-Cerdas, V., Piedra-Castro, L., Romero-Vargas, M., y Bermúdez-Rojas, T. (2018).** Indicadores ambientales de áreas verdes urbanas para la gestión en dos ciudades de Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 66(4), 1421–1435. <https://doi.org/10.15517/rbt.v66i4.32258>
- Norton, B. A., Coutts, A. M., Livesley, S. J., Harris, R. J., Hunter, A. M., y Williams, N. S. G. (2014).** Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 134, 127–138. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.018>
- Oke, T. R., Spronken-Smith, R. A., Jáuregui, E. y Grimmond, C. S. B. (1999).** The energy balance of central Mexico City during the dry season. *Atmospheric Environment*, 33(24–25), 3919–3930. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00134-X](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00134-X)
- Pan, S., Zhao, X., & Yue, Y. (2019).** Spatiotemporal changes of NDVI and correlation with meteorological factors in northern China from 1985–2015. *E3S Web of Conferences*, 131, 1-5. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913101040>
- Parada Molina, P. C., y Cervantes Pérez, J. (2017).** Captación de agua de lluvia y niebla en la época de secas en la ciudad de Xalapa, Veracruz, México. *Ingeniería del Agua*, 21(3), 153–163. <https://doi.org/10.4995/ia.2017.5661>
- Quattrochi, D. A., y Luvall, J. C. (2004).** Thermal remote sensing in land surface processing. *CRC Press*, 9 -33. <https://doi.org/10.1201/9780203502174>
- Sancho-Zurita, J. V., Crespo-Nuñez, X. L., Espinoza-Altamirano, A. D., Lasso-Barreto, S. V., y Ochoa-Quezada, V. O. (2025).** Relación entre el Índice de Vegetación NDVI, Temperatura Superficial y Radiación Solar en Áreas Urbanas de la Parroquia Calderón, Quito, Ecuador, analizada en base de teledetección. *Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 6(1), 3505–3517. <https://doi.org/10.56712/latam.v6i1.3588>
- Schwaab, J., Meier, R., Mussetti, G., Seneviratne, S., Bürgi, C., y Davin, E. L. (2021).** The role of urban trees in reducing land surface temperatures in European cities. *Nature Communications*, 12(1), 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26768-w>
- Seto K. C., Güneralp B., y Hutyra L. (2012).** Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools, *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 109 (40) 16083-16088. <https://tinyurl.com/2tndzscd>
- Stewart, I. D., y Oke, T. R. (2012).** Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>

- Vargas-Huipe, N. D., y Rodríguez-Van Gort, M. F. (2024).** Clima cambiante en la Zona Metropolitana de Xalapa: Factores naturales y antrópicos. *Investigaciones Geográficas Boletín del Instituto de Geografía*, (114),1-16. <https://doi.org/10.14350/rig.60855>
- Yengoh, G. T., Dent, D., Olsson, L., Tengberg, A. E., y Tucker, C. J. (2015).** Applications of NDVI for land degradation assessment. En *SpringerBriefs in environmental science*. 17-25. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24112-8_3
- Zavaleta-Palacios, M., Díaz-Nigenda, E., Vázquez-Morales, W., Morales-Iglesias, H., y Narcizo de Lima, G. (2020).** Urbanización y su relación con la isla de calor en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 7(2), 1-12. <https://doi.org/10.19136/era.a7n2.2485>
- Zhou, D., Zhao, S., Liu, S., Zhang, L., y Zhu, C. (2014).** Surface urban heat island in China's 32 major cities: Spatial patterns and drivers. *Remote Sensing of Environment*, 152, 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.05.017>