Revista del Centro de Investigación de la Universidad La Salle
Vol. 15, No. 60, Julio-Diciembre, 2023: 123-160
DOI: http://doi.org/10.26457/recein.v15i60.3509

El efecto isla de enfriamiento del parque en condiciones áridas. Una perspectiva de sensibilidad remota

The park cooling island effect in arid conditions. A remote sensing perspective

Luis Ernesto Cervera Gómez
El Colegio de Chihuahua (México)

Miriam García Dena
El Colegio de Chihuahua (México)

Diego Adiel Sandoval Chávez[1]
Tecnológico Nacional de México/ I T de Ciudad Juárez (México)

Aida Yarira Reyes Escalante
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (México)

Recibido: 21 de julio de 2022

Aceptado: 07 de junio de 2023

Publicado: 21 de agosto de 2023

Resumen

El objetivo de este artículo fue explorar una conformación preliminar para la estimación del fenómeno Isla de Enfriamiento del Parque en Ciudad Juárez, México. También se desarrolló un mapa autómata de superficies para mostrar, mediante sensibilidad remota, el efecto de los

[1] Email: dsandoval@itcj.edu.mx

Revista del Centro de Investigación de la Universidad La Salle editada por la Vicerrectoría de Investigación - Universidad La Salle México se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

espacios verdes urbanos en el ambiente térmico en superficie. Lo anterior, mediante la identificación de las zonas en las que la Isla de Enfriamiento del Parque tiene mayor relevancia. El área de estudio fueron los espacios verdes urbanos de Ciudad Juárez, México. Se utilizaron las imágenes satelitales de Landsat 8 y un algoritmo para determinar la estimación de la temperatura superficial desarrollado por ERDAS IMAGINE 14, para procesar datos del satélite; además, se utilizó ArcMap 10.8.1 para la estimación de temperatura. Los resultados revelaron que dos espacios: el Parque Central y el Club Campestre logran regular la temperatura hasta en 13° C, con relación a la de sus alrededores. Los resultados permiten concluir acerca de la importancia de la regulación térmica de la ciudad y de la importancia de los parques urbanos y otras áreas verdes como prestadores de servicios de regulación térmica.

Palabras clave: Espacios verdes urbanos; satélite Landsat 8; isla de calor urbano; regulación térmica; confort térmico.

Abstract

The objective of this paper was to explore a preliminary conformation for the estimation of the Park Cooling Island phenomenon in Juarez, Mexico. The paper also presents an automata map of surfaces to show the effect of urban greenspace on the surface thermal environment via remote sensing, thus identifying the areas where the Park Cooling Island is most relevant. The study area was the urban greenspace of Juarez, Mexico. Landsat 8 satellite images were processed through ERDAS IMAGINE 14.0 algorithm to determine surface temperature estimation. ArcMap 10.8.1 was also adopted for temperature estimation. The results revealed that two green spaces: Parque Central and Club Campestre managed to regulate the temperature by up to 13° C in relation to their surroundings. Based on the results, it is possible to conclude about the importance of thermal regulation in the city and the role of urban green spaces, particularly those of large scale, as providers of thermal regulation services.

Keywords: Urban greenspace, Landsat 8 satellite, urban heat island, thermal regulation, thermal comfort.

Introducción

Los espacios verdes urbanos (EVU) brindan una amplia gama de beneficios sociales, económicos y medioambientales, en estos últimos se incluye la capacidad de regular la temperatura, un servicio ecosistémico muy reconocido (Lara-Pulido et al., 2018). La abundancia y distribución espacial de los EVU tiene una fuerte influencia en las condiciones ambientales de las ciudades, ya que la vegetación interactúa con los flujos de energía a través de los procesos de reflexión y absorción selectiva de la radiación solar (Li et al., 2018). La vegetación presente en los EVU tiene un efecto de reducción de la temperatura relacionado con los procesos de interceptación de la radiación solar, destacando los árboles, que proporcionan sombra y refugio, dando lugar a zonas con gradientes de temperatura en el rango de 2 a 12° C, dependiendo de varios factores, como la especie, el área foliar, el tipo de suelo, las prácticas de riego o la zona climática (Shashua-Bar et al., 2009).

La vegetación genera un efecto termorregulador localizado al que se le suele denominar Isla de Enfriamiento del Parque (*Park Cooling Island*, PCI) (Stabler et al., 2005; Ren et al., 2013). El PCI tiene un efecto amortiguador y compensa el fenómeno Isla de Calor Urbano (*Urban Heat Island*, UHI) el cual, con algunas excepciones, se caracteriza por una diferencia al alza de temperatura entre el área urbana y el ambiente rural que la rodea (Oke, 1973; Renard et al., 2019). Los efectos de la UHI se derivan a su vez de la acción conjunta de diferentes fuentes y condiciones térmicas, tales como la escala de la ciudad, el pavimento, el asfalto, las edificaciones, los materiales inertes, los colores oscuros, ocre y mate, las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero, el cambio en la traza urbana o la densidad de viviendas, entre otros. Como se verá más adelante, estos factores transmutan las superficies del albedo, afectan la emisividad y cambian la dinámica de los fenómenos que afectan la temperatura en las zonas urbanas (Amani-Beni et al., 2018; Azevedo et al., 2016).

El efecto de regulación térmica de la vegetación en los EVU también es consecuencia de la evapotranspiración, un proceso físico-biológico consistente en la acción conjunta de la evaporación y la transpiración. En cuanto a la evaporación, la incidencia de energía de entrada y salida se mitiga convirtiéndose en vapor de agua, en lugar de convertirse en calor (Manzur y Cardoso, 2015; Kwarteng y Small, 2010). Mediante este fenómeno físico, las

moléculas con más energía (más calor) abandonan la superficie líquida, con la consiguiente reducción de temperatura, adicionándose al vapor hasta que el aire se satura. En este sentido, la evaporación es más pronunciada en condiciones áridas, como las localizadas en el noroeste de México. (Roy et al., 2012; Roloff et al., 2009).

Por su parte, la transpiración es un proceso biológico multifuncional que tiene como encargo principal mantener el balance hídrico de la planta, este depende de tres factores: la cantidad de agua presente, el clima prevalente y la especie vegetal (Oke et al., 1989). Mediante el proceso de la transpiración, la vegetación cede agua al ambiente a través del sistema estomático en el envés de las hojas. El efecto de la transpiración en la regulación térmica es menor que el de la evaporación, pero aun así es un proceso decisivo que abona al fenómeno PCI (Hemsley et al., 2004).

A los diversos beneficios sociales de los EVU, como la recreación, la interacción o el descanso, se suman los beneficios medioambientales, en este caso la regulación térmica, que da lugar al confort térmico en la intemperie (Zhang et al., 2020). Aquí se destaca que al incrementar la sensación subjetiva de confort, los servicios de regulación de los EVU fomentan e intensifican su uso (Armson et al., 2013).

Con el marco anterior, el objetivo primario de este trabajo es explorar una conformación preliminar para la estimación del fenómeno PCI en una región árida, como lo es Ciudad Juárez, México. Como objetivos secundarios se establecen: a) Desarrollar un mapa autómata de superficies para mostrar, mediante sensibilidad remota, el efecto de los EVU en el ambiente térmico en superficie; así como b) Identificar las zonas en las que el fenómeno PCI tiene mayor relevancia.

Si bien existen abordajes híbridos, la estimación del PCI puede llevarse a cabo mediante la medición de la temperatura en el aire o en superficie. En el primer caso, la estrategia es tomar mediciones de la temperatura del aire aproximadamente a 1.3 - 1.5 m de altura dentro de los límites de una determinada área vegetada y compararlas con las lecturas obtenidas en los alrededores, usualmente dentro de un radio de 500 m (Brown et al., 2015; Chang et al., 2007). En el segundo caso, las mediciones pueden realizarse con sistemas de sensibilidad remota (Avdan y Jovanovska, 2016; Zhanga et al., 2013). En este sentido, destaca el Satélite

Landsat 8 que cuenta con los sensores *Operational Land Imager* (OLI) (banda 4 y banda 5) para el cálculo del Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) y el *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) (banda10) para el mapeo térmico de la superficie. El uso de Landsat 8 es una alternativa para la estimación del PIC que, si bien requiere de cálculos técnicos, permite conocer la temperatura en superficie y el eventual efecto de los EVU en el ambiente térmico.

La temperatura en superficie provee un insumo importante para el estudio de los aspectos climáticos y otros fenómenos en superficie a diferentes escalas, siendo el énfasis de este trabajo en la escala local, es decir, a nivel ciudad. La diversidad de materiales de construcción con bajo albedo presentes en la ciudad, la variedad de coberturas del suelo o las asimetrías en la distribución espacial de las EVU, destacan la necesidad de estudiar las características de la reflectancia, lo que se conoce como las "firmas espectrales" de los diferentes materiales en superficie (Herold y Roberts, 2010). Este planteamiento de investigación, además de abordar una temática incipiente en una ciudad árida del norte de México, abona a destacar la importancia de los EVU, aspirando a que los hallazgos que la investigación reporta subrayen la importancia de estos espacios y sirvan de referencia para el desarrollo de mejores esquemas de gestión, reforzando así su concepción como territorios de naturalidad multifuncionales que tienen un alto impacto en la calidad de vida de los habitantes de la ciudad. Ulteriormente, el poner en relieve el efecto del fenómeno PCI en una ciudad árida, con escasa vegetación, tiene el potencial de influir en el desarrollo de mejores políticas públicas relativas a la generación y reforzamiento de los EVU en las regiones áridas, una temática relevante que es pertinente para una amplia zona del territorio nacional y cuyo abordaje en México es incipiente (González et al., 2021).

1. Revisión de la Literatura

1.1. Imágenes satelitales, sensores remotos y ambiente térmico

La expresión "socializar el pixel", sugerida por Geoghegan et al. (1998), conlleva la idea que las imágenes sean más que iconografías registradas por un satélite acerca de elementos inertes confinados al interés de las Ciencias de la Tierra, una de las disciplinas donde encontraron su génesis epistemológica. Esto es, a la unidad espacial de la imagen satelital se le puede

conferir significado social si a los satelitales se le concibe como espectadores de muchas expresiones de la dinámica social que se ven reflejadas en las imágenes que registran. Precisamente, una de estas manifestaciones se refiere al estudio del ambiente térmico, específicamente a la temperatura en superficie, cuya estimación es posible gracias al cálculo basado en pixeles (Avdan y Jovanovska, 2016). La literatura es reiterativa al afirmar que el ambiente térmico y el confort están íntimamente relacionados y que es posible construir un puente entre el confort térmico y el uso intensivo de los EVU, al que se apareja un gran beneficio social. Aunado a esto, las altas temperaturas en las ciudades afectan la salud, causando fatiga, mareos, respiración agitada, aumento del ritmo cardiaco y golpes de calor, lo que incrementa las tasas de mortalidad (Zhang et al., 2020). En este sentido, el Municipio de Juárez está considerado por el Centro Nacional de Desastres (CENAPRED) como de alto riesgo por temperaturas máximas y ondas de calor (Jiménez et al., 2018).

Por medios satelitales también es posible revelar los gradientes térmicos entre los EVU y sus inmediaciones, es decir, poner de manifiesto los servicios de regulación que brindan los EVU de forma que, al ponerlos en perspectiva en relación con los ahorros de energía que potencialmente traerían consigo, se descubran avenidas para la mejora de su gestión y se promueva la inversión en estos espacios (Akbari, 2002). Los anteriores constituyen tan solo algunos ejemplos de cómo, basándose en imágenes satelitales y combinando cierto conocimiento y experiencia en Sistemas de Información Geográfica (SIG), es posible abordar temáticas sociales que afecten a la población y al ambiente, mostrando que la temperatura en superficie se relaciona de manera inversa con el vigor vegetal, tomando como referencia una ciudad localizada en la zona árida del norte de México.

La literatura en materia de sensibilidad remota y ambiente térmico es vasta. Estudios en Asia muestran que la vegetación, su configuración y sus características son factores que delinean el efecto PCI (Wang et al., 2018; Xie y Li, 2020; Wang et al., 2022). En un estudio que utilizó esta técnica para calcular temperatura en superficie, se encontró un decremento promedio de 4º C al analizar un área urbana que cambió de industrial a residencial debido al incremento en la vegetación, medida por el NDVI (Renard et al., 2019). Mientras que en otro estudio con sensibilidad remota en condiciones ideales (cielos despejados y velocidad de

viento muy baja), se mostraron diferencias promedio en el ambiente térmico entre lo urbano y lo rural en el umbral de 5 a 10º C (Azevedo et al., 2016). Resultados similares a los anteriores se obtuvieron en España (García-Haro et al., 2019; García Haro y Arellano Ramos, 2018). En Latinoamérica las investigaciones relativas al fenómeno PCI son escasas. La mayoría de los trabajos solamente enfatiza el fenómeno UHI, otros estudiaron el efecto de los humedales en el ambiente térmico, mientras que otros se enfocan en temperatura del aire. En todo los casos se registraron decrementos en la temperatura debidos a la vegetación y a los cuerpos de agua (Casadei et al., 2021; González et al., 2020; Sandoval-Chávez, 2020; Menacho y Teruya, 2019; Meneses y Iral, 2017; Díaz Vázquez y Curiel Ballesteros, 2012; Romero Aravena et al., 2011). Por lo que respecta a los estudios en el norte de país, destaca la investigación de González et al. (2021), quienes condujeron un estudio conjunto de UHI y PCI en la ciudad de Hermosillo, se encontró que aumentar la cobertura vegetal en un 10 % tiene el potencial de disminuir en 1.1º C la temperatura en superficie. En la anterior investigación se destaca la escasez de estudios en las zonas áridas de México que muestren el efecto de la vegetación urbana en la temperatura mediante sensibilidad remota.

1.2. Satélite Landsat

La familia de satélites Landsat inicia con su primera versión que se lanzó en 1972. Desde entonces, han estado disponibles imágenes espectrales para diferentes propósitos. En la actualidad orbitan las versiones 7,8 y 9 de la serie Landsat, lanzados en 1989, 2013 y 2021, respectivamente. Este trabajo se centra en el Landsat 8, cuya órbita permite visitar un mismo lugar cada 16 días (Khorram et al., 2017). En total el satélite tiene 11 bandas, pero solo son necesarias las bandas 4 y 5 para el cálculo del NDVI y la banda 10 o banda térmica para el cálculo del flujo de energía en superficie y el cálculo final de la temperatura en superficie (ver Tabla 1).

Tabla 1

Sensores y bandas de Landsat 8 para la estimación del NDVI y la temperatura en superficie.

Sensor	Banda y ancho de banda	Capacidades/aplicaciones
OLI	B4 (roja, 0.64-0.67 μm)	Discriminación de vegetación, delineación de tipos de suelos y límites geológicos.
OLI	B5 (infrarrojo cercano, 0.85-0.88 μm)	Identificación de cultivos, enfatiza los contrastes: suelo-cultivo y tierra-agua.
TIRS	B10 Infrarrojo térmico, 10.6-11.9 μm)	Mapeo térmico, estudios de humedad en el suelo.

Nota. Khorram et al. (2017).

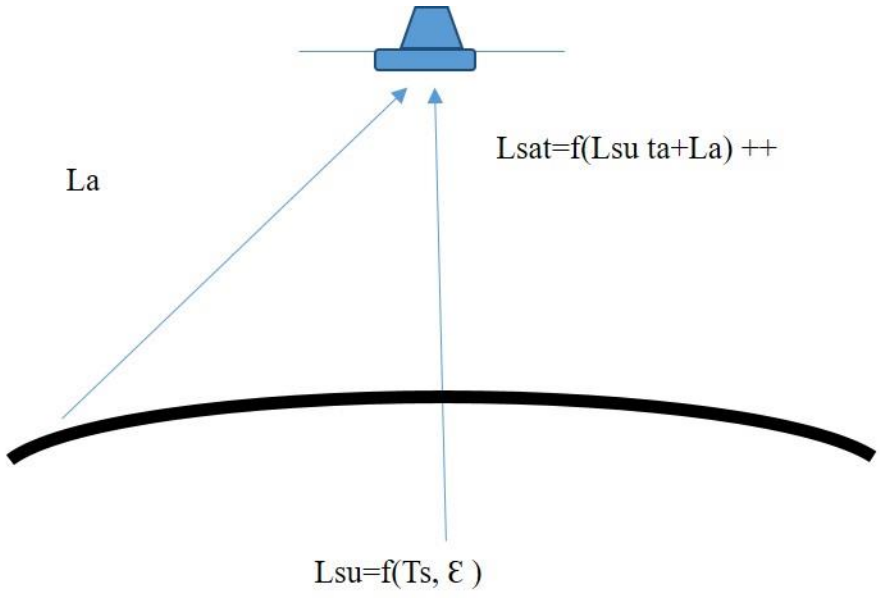
1.3. Principios de radiación térmica

Es necesaria cierta comprensión de los principios de la radiación térmica si se desea interpretar una imagen capturada por los satélites y entender de qué manera la energía electromagnética emitida por los materiales en superficie se relaciona con la medición de temperatura de acuerdo con las leyes de Stefan, Boltzman y Wein (Kwarteng y Small, 2010). Los objetos cuya temperatura está por encima de 0° K emiten radiación térmica debido a la energía cinética de las moléculas. Si un objeto emite y absorbe radiación de manera perfecta, siguiendo la ecuación de Plank, se trata de un “cuerpo negro” (Schowengerdt, 1997). Sin embargo, en la naturaleza los materiales no se comportan de forma perfecta, por lo que suele considerárseles como “cuerpos grises”.

La Ley de Stefan-Boltzman establece que la energía que un cuerpo negro emite (*M*, en W/m^2) está en función de la temperatura en superficie y se expresa como $M = \sigma T^4$, donde σ es la constante de Stefan-Boltzman (5.6697 x 10^{-8} W/m (K)$^{-4}$ y *T* es la temperatura absoluta (^{o}K). Se agrega el valor de emisividad (εv) para describir la intensidad de la radiación ascendente (*Jv*) emitida por una superficie real en cualquier número de ondas. Valores $\varepsilon v<1$ corresponden a cuerpos grises, mientas que valores $\varepsilon v=1$ corresponden a un cuerpo negro. De esta manera, la intensidad espectral de la radiación ascendente relacionada con la autorradiación de calor de superficie con la temperatura T_s, se define por $Jv=\varepsilon v(Bv)(Ts)$, donde *Ts* es la temperatura en superficie, *Bv* es la función de Plank y εv es la emisividad en superficie (Kustensov et al., 2012). Entonces, es posible determinar la temperatura en superficie, dada la relación entre la energía emitida por el suelo (L_{su}) y la recibida por el sensor (L_{sat}) y entre ambas mediciones, considerando los componentes atmosféricos que también emiten su propia energía (Figura 1).

Figura 1

Relación entre la energía emitida por el suelo y la recibida por el sensor TIRS de Landsat 8.



Nota. Elaboración propia

2. Método

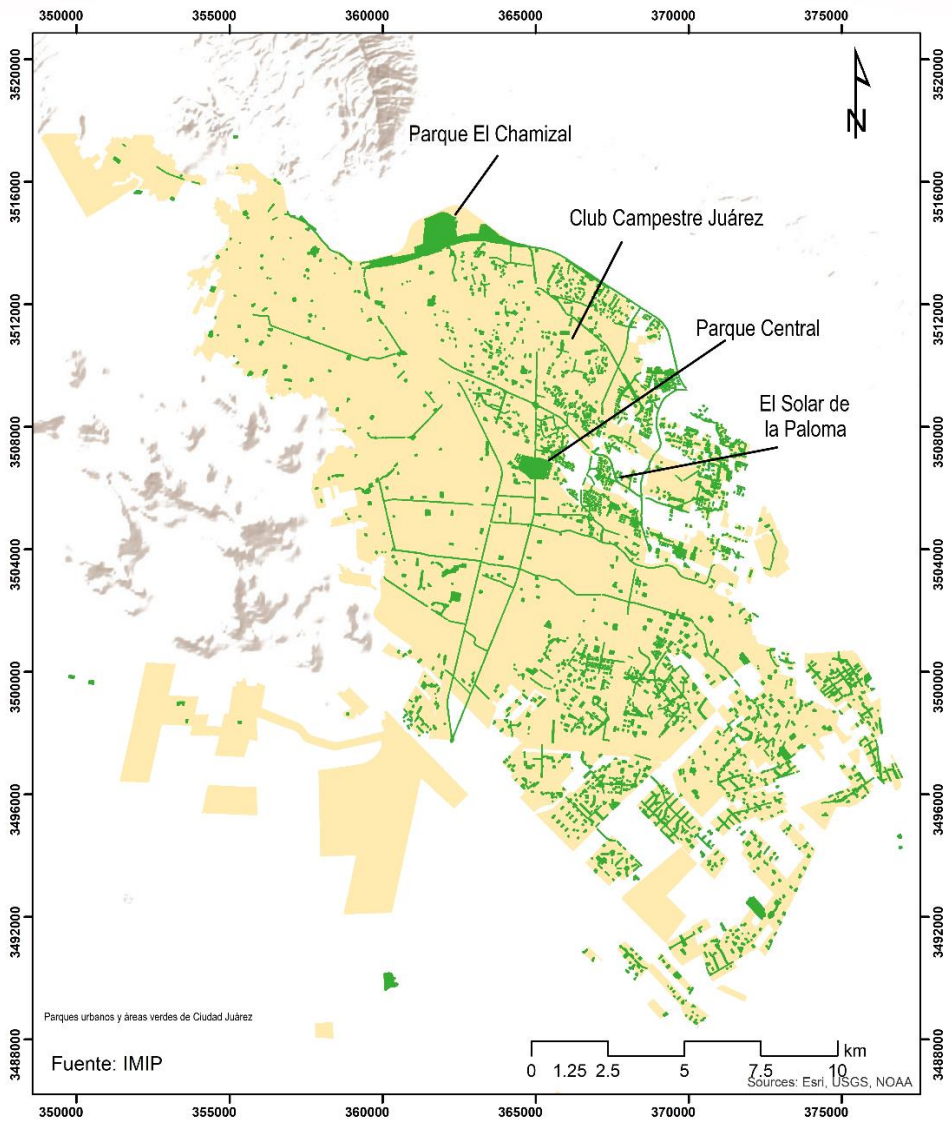
2.1. Condiciones demográficas y climáticas en Ciudad Juárez y selección de los sitios a estudiar

Ciudad Juárez se localiza en el estado de Chihuahua, en el norte de México, es una ciudad binacional fronteriza que hace vecindad con El Paso, Texas. De acuerdo con datos de IMIP (2021), el municipio de Juárez cuenta con aproximadamente 1.5 millones de habitantes y comprende un área de 3561 km^2. El Municipio de Juárez se ubica en una región geográfica de clima desértico frío en la clasificación climática de Köppen BWK, es decir, condiciones secas con régimen de lluvias en los cálidos veranos. La precipitación promedio anual es de alrededor de 225 mm. Se estima que existan 4120 EVU de los cuales 2942 son parques (Urrutia, 2020), los principales espacios vegetados son el Parque Federal El Chamizal, El Parque Central, el Club Campestre Juárez y el Fraccionamiento Solar de la Paloma (Figura 2). En general, los EVU de Ciudad Juárez no necesariamente están vegetados, no son de buena calidad ni distribuidos equitativamente (Herrera-Correa y Romo-Aguilar, 2021).

Siguiendo las recomendaciones de González et al. (2021) quienes sugieren la elección de EVU de escala considerable para apreciar la regulación térmica, se seleccionaron el Parque Central y el Club Campestre para estimar el fenómeno PCI. El Parque Central es un espacio público de aproximadamente 12 ha de áreas verdes y cuerpos de agua cuya gestión recae en la esfera del gobierno estatal. El Club Campestre es privado, comprende una superficie de 55 ha, cuenta con un campo de golf, cuerpos de agua y áreas verdes. El Parque Federal El Chamizal no se consideró porque es un parque binacional, una parte de este espacio está en territorio estadounidense, en donde la gestión es diferente, así que no se tendría una referencia uniforme en cuanto a su potencial de regular la temperatura. Por otra parte, el Fraccionamiento Solar de la Paloma es un conjunto habitacional muy heterogéneo y en constante cambio debido a nuevas edificaciones, además de que sus áreas públicas se restringen casi en su totalidad a las calles y los camellones.

Figura 2

Mapa de áreas verdes de Ciudad Juárez



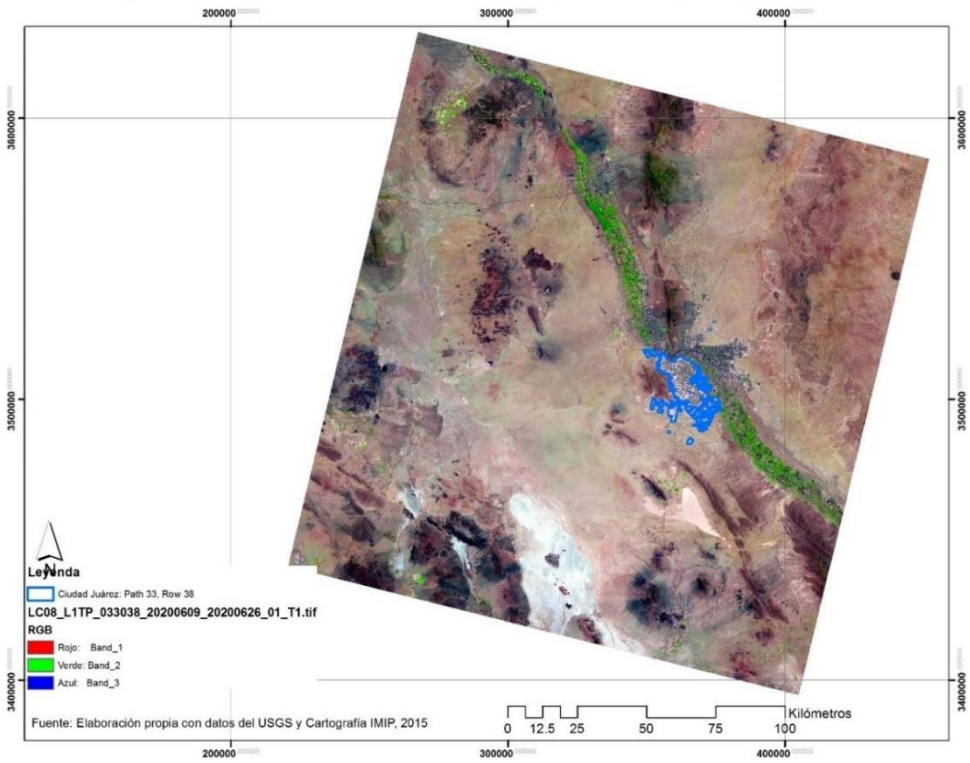
Nota. Elaboración propia

2.2. Imagen satelital utilizada

El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) tiene a disposición del público las imágenes satelitales de diversas plataformas espaciales, entre ellas Landsat 8. Los datos están accesibles en el portal http://earthexplorer.usgs.gov. La escena correspondiente a Ciudad Juárez se encuentra en el recorrido satelital de la columna 33 y fila 38. Se seleccionó la imagen con fecha del 9 de junio del 2020 (Figura 3), los metadatos de esta imagen requeridos para este trabajo se muestran en la Tabla 2.

Figura 3

Imagen de Ciudad Juárez del satélite Landsat 8 (9 de junio de 2020)



Nota. Elaboración propia

Tabla 2

Metadatos relevantes para la investigación.

Dato	Descripción
Identificación (ID) de la imagen	LC08_L1TP_033038_20200609_20200626_01_T1
Día de adquisición	9 de junio del 2020 (día sin nubes ni vientos, en el mes más caluroso)
Hora de paso por Ciudad Juárez	5:39 pm (hora pico del calor)
Proyección	UTM
Datum y Elipsode	WGS-84
Zona UTM	13 Norte
Tamaño del píxel en las bandas reflectivas (4 y 5) y térmica (10)	30 metros
Bandas 4, 5 y 10 (DN)	LC08_L1TP_033038_20200609_20200626_01_T1_B4.TIF (B4) LC08_L1TP_033038_20200609_20200626_01_T1_B5.TIF (B5) LC08_L1TP_033038_20200609_20200626_01_T1_B10.TIF (B10)
Factor de reescalamiento multiplicativo (gain)	Radiance Multiband 10= 3.3420E-04
Factor de reescalamiento aditivo (offset)	Radiance ADD BAND 10 = 0.10000
Constante de conversión técnica K1	K1 CONSTANT BAND 10 =774.8853
Constante de conversión técnica K2	K2 CONSTANT BAND 10 = 1321.0789

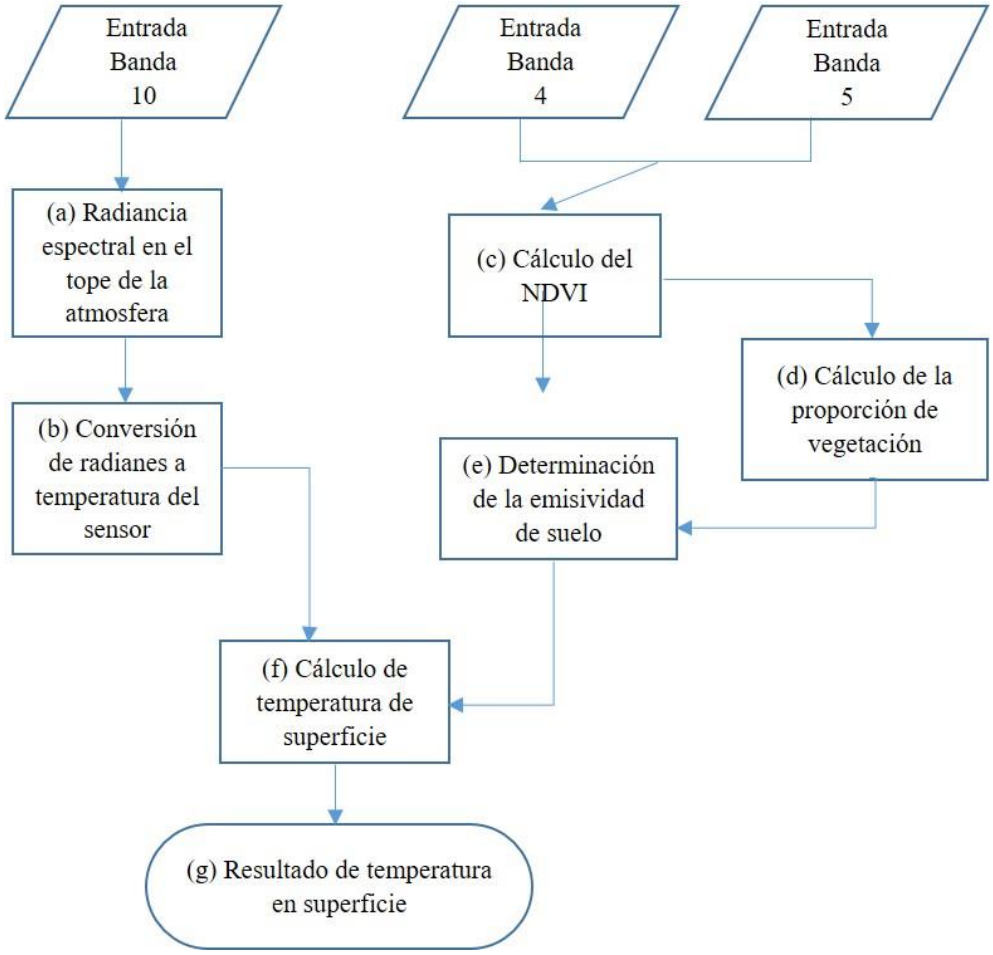
Nota. Obtenidos de la tabla de metadatos en formato .txt anexados con los archivos de la imagen LC08_L1TP_033038_20200609_20200626_01_T1_MTL

2.3. Algoritmo de estimación

El algoritmo para determinar la estimación de la temperatura superficial fue desarrollado por la firma ERDAS IMAGINE 14.0 y es posible utilizarlo para procesar datos del satélite Landsat 8, gracias a la capacidad de tratar con la complejidad de sus datos (Avdan y Jovanovska, 2016). En esta investigación se utilizó ArcMap 10.8.1 para procesar el mismo modelo de estimación de temperatura en superficie siguiendo los pasos del flujo de trabajo de la Figura 4.

Figura 4

Diagrama de flujo del modelo de estimación de temperatura en superficie



Nota. Modificado de Avdan y Jovanovska (2016)

2.3.1. Cálculo de la temperatura superficial

Los pasos para la extracción de los datos térmicos y el cálculo de la temperatura superficial del suelo desde una imagen satelital son los siguientes.

a. Estimación de la Radiancia Espectral ($L\lambda$) TOA (*Top of Atmospheric*)

$$L_\lambda = M_L Q_{cal} + A_L - O_i \qquad (1)$$

Donde:

$L\lambda$ = Radiancia en el sensor

ML = Factor multiplicativo reescalado específico de la banda = 0.0003342, este factor también se conoce como *gain*.

Qcal = La imagen, en este caso la banda 10

AL = factor aditivo reescalado específico de la banda= 0.10000, factor también conocido como *offset*.

Oi = indica la corrección para la Banda 10

Cálculo de TOA en la calculadora ráster de ArcMap (ver Figura 5a):

$$TOA = 0.0003342 * \text{LC08_L1TP_033038_20200609_20200626_01_T1_B10.TIF} + 0.1 \qquad (2)$$

b. Conversión de Radiancia del sensor de Temperatura (BT)

BT es referida como la temperatura de un cuerpo negro y puede ser derivada desde las bandas de infrarrojo térmico provistas por los satélites mediante la Ley de Planck (Dash et al., 2010; Flynn et al., 2001). En un primer paso, los números digitales (*DN*) contenidos en cada píxel de la imagen Landsat 8 en la banda infrarrojo térmico (banda 10) son convertidos a Radiancia (ver Figura 5b):

$$\mathrm{BT} = \frac{\mathrm{K}_2}{\mathrm{In}[(K_1/\mathrm{L}\lambda) + 1]} - 273.15 \qquad (3)$$

Donde:

BT = es la temperatura de brillo

K_1 y K_2 = representan la constante de conversión térmica específica de la banda = 774.8853 y 1321.089 respectivamente

$L\lambda$ = Radiancia Espectral en el tope de la atmósfera (TOA)

-273.15 = es el cero absoluto en °C

Cálculo de BT en la calculadora ráster de ArcMap:

$$BT = 1321.0789/\mathrm{Ln}((774.885/TOA) + 1) - 273.15 \qquad (4)$$

c. Método NDVI para Corrección de Emisividad

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, conocido como NDVI por sus siglas en inglés, se define como:

$$NDVI = \frac{NIR\ (banda\ 5) - R\ (banda\ 4)}{NIR\ (banda\ 5) + R\ (banda\ 4)} \qquad (5)$$

Se utiliza para para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación. La banda 5 representa al Infrarrojo Cercano con una longitud de onda cercana a 0.8 μm del espectro electromagnético y la banda 4 al Rojo con una longitud de onda aproximada a 0.6 μm de la región del espectro (Carlson y Ripley, 1997) (ver Figura 5c).

Cálculo del NDVI en la calculadora ráster:

$$NDVI = \text{float (B5.tif – B4.tif) / float (B5.tif + B4.tif)} \qquad (6)$$

d. Cálculo de la Proporción de Vegetación (P_v)

La estimación de la proporción de la vegetación (ver Figura 5d), también referida como fracción de cobertura vegetal, es requerida para posteriormente estimar la emisividad (Renard et al, 2019) y se define por la siguiente fórmula (ecuación 7):

$$Pv = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{máx} - NDVI_{min}}\right)^2 \qquad (7)$$

Fórmula para la calculadora ráster (ecuación 8):

$$P_v = \text{square}(\text{“NDVI”.tif} - 0.216901)/(0.632267 - 0.216901) \qquad (8)$$

e. Cálculo de la Emisividad de la Superficie de Suelo (LSE)

La fórmula para el cálculo de la emisividad (ver Figura 5e) está dada por:

$$\varepsilon_\lambda = \varepsilon_{v\lambda} P_v + \varepsilon_{s\lambda} (1 - P_v) + C_\lambda \qquad (9)$$

Donde:

ε_v y ε_s = emisividades de vegetación y suelo, respectivamente

C = rugosidad de la superficie

Cálculo de la Emisividad en la calculadora ráster (ecuación 10):

$$E = 0.004 * \text{”Pv”} + 0.986 \qquad (10)$$

Condiciones para el cálculo de las emisividades:

$$\varepsilon_\lambda = \begin{cases} \varepsilon_{s\lambda} & NDVI < NDVI_s \\ \varepsilon_{v\lambda} P_v + \varepsilon_{s\lambda}(1 - P_v) + C & NDVI_s \leq NDVI \leq NDVI_v \\ \varepsilon_{s\lambda} + C & NDVI > NDVI_v \end{cases} \qquad (11)$$

f. Emisividad corregida de la Temperatura de la Superficie de Suelo (T_s)

$$T_s = \frac{BT}{\{1 + [(\lambda \mathrm{BT}/\rho) In\ \varepsilon_\lambda]\}} \quad (12)$$

Donde:

Ts = Temperatura de Superficie de Suelo en grados Celsius (°C)

BT = Temperatura de Brillo del sensor (°C)

λ = longitud de onda de la radiancia emitida

ε_λ = emisividad calculada en el paso anterior

Definición del parámetro ρ

La definición de ρ está dada por:

$$\rho = \mathrm{h}\frac{c}{\sigma} = 1.438 \times 10^{-2}\ mK \quad (13)$$

Donde:

σ = constante de Stefan-Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K)

h = constante de Planck (6.626×10^{-34} J s)

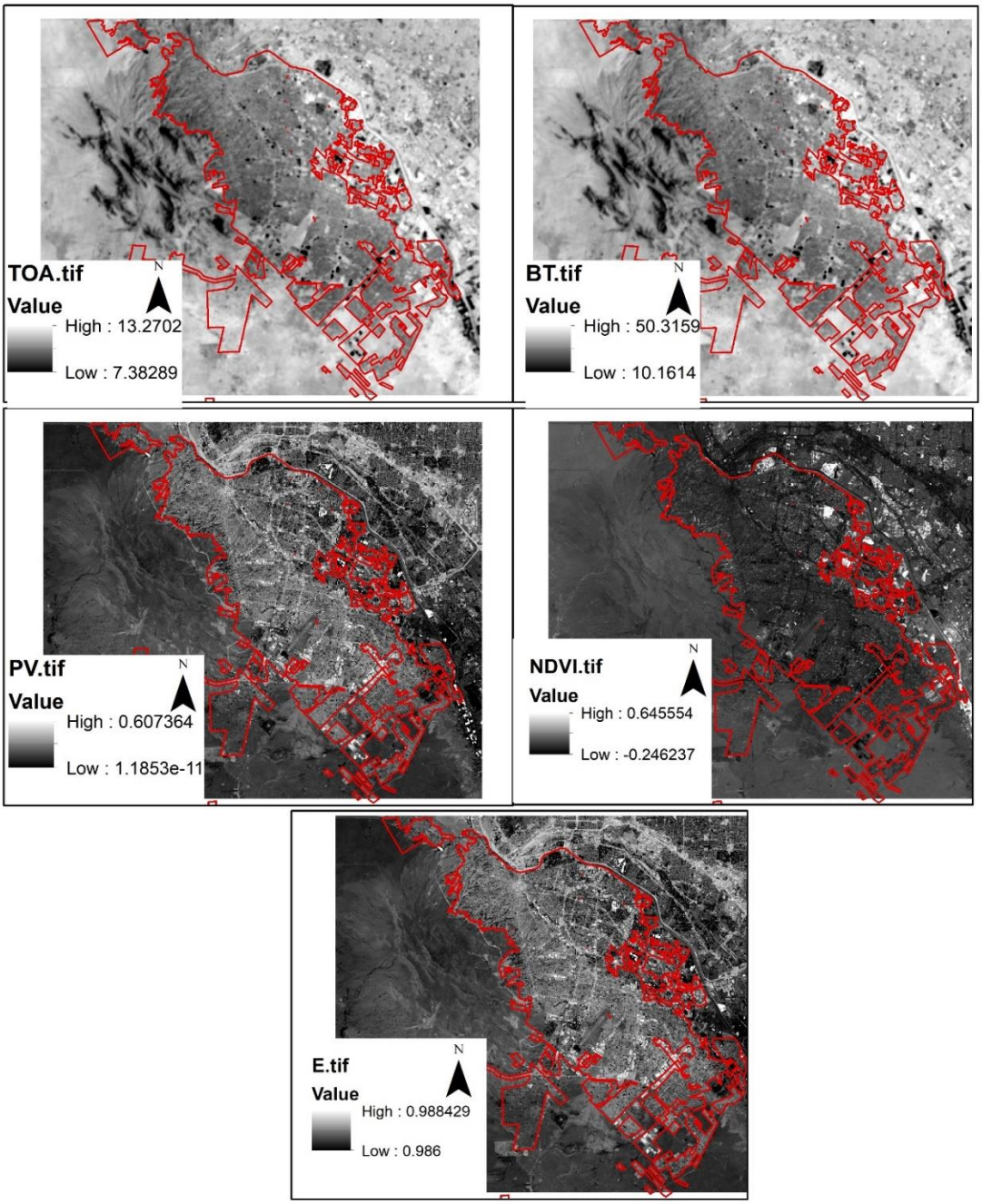
c = velocidad de la luz (2.998×10^{8} m/s)

g. Cálculo de la Temperatura superficial (Ts) en la calculadora ráster:

$$T_s = \mathrm{BT.tif}/(1 + (0.0015 * \mathrm{BT.tif}/1.4388) * \mathrm{Ln(E)})) \quad (14)$$

Figura 5

Resultados del cálculo de TOA, radiancia espectral, NDVI, porcentaje de vegetación (PV) y emisividad (ε) en ArcMap 10.8.1



Nota. elaboración propia

2.3.2. Isla de Enfriamiento del Parque (PCI)

Posteriormente, para estimar el PCI se establecieron zonas de influencia (*buffers*), alrededor del Club Campestre y el Parque Central, dichas zonas son creadas cada 30 m desde los límites del parque hasta alcanzar los 500 m de distancia. Lo anterior atendiendo a la recomendación de Li et al. (2020), quienes definen el fenómeno PCI como la diferencia entre la temperatura media al interior del parque y la temperatura media exterior a una distancia de 500 m. Como ya se ha visto, el PCI calcula la diferencia de temperatura dentro y fuera de las EVU tomando en cuenta una zona de influencia determinada. La zona de influencia incluye áreas alrededor de los EVU que tienen diferentes tipos de cobertura de suelo como edificios, carreteras, árboles, otras áreas verdes o superficies impermeables. En este estudio, el PCI se estima en grados centígrados (°C) tomando en cuenta la temperatura en superficie promedio y se define con la siguiente ecuación:

$$PCI = \Delta T = T_u - T_p \qquad (15)$$

Donde:

Tu= temperatura en superficie promedio a los 500 m en el área de influencia alrededor de un EVU.

Tp= temperatura en superficie promedio dentro del EVU.

3. Resultados

3.1. Perfil térmico general

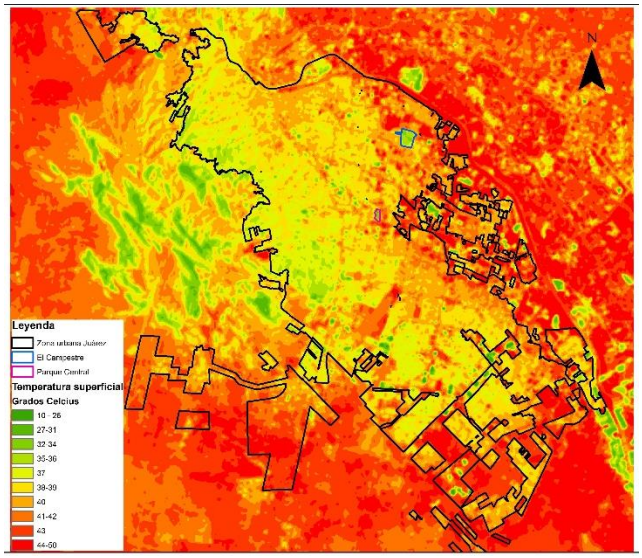
El mapa de temperatura de superficie estimado para el área urbana de Ciudad Juárez y sus periferias (Figura 6) indica un rango de temperaturas de 10 a 26° C en la Sierra de Juárez y en el poniente, así como en algunos parques industriales. Sin embargo, al interior de la mancha urbana se tienen temperaturas de 36 a 39° C en gran parte de la ciudad, así como

rangos de entre 43 y hasta 50° C en la parte más desarrollada de la comunidad. En general, hasta 40° C de diferencia entre los rangos mínimos y rangos máximos en el contexto urbano. La zona del poniente al tener pocas calles pavimentadas cuenta con temperaturas más bajas.

En una primera exploración sobre el resultado de temperatura en superficie, se crea un transecto de aproximadamente 30 kilómetros, iniciando en un área de menor temperatura como la Sierra de Juárez, entrando a la ciudad por el poniente para llegar al Parque Federal El Chamizal y posteriormente al Campo de Golf del Club Campestre. Continúa hacia la zona de El Solar de la Paloma, pasando por el Parque Central y cerrando en algún punto de la Sierra. Como resultado, ArcMap provee el perfil de temperaturas. Esta gráfica destaca la importancia de los EVU de gran escala (Figura 7), donde se aprecian intervalos de disminución en los registros de temperatura que indican el efecto del fenómeno PCI.

Figura 6

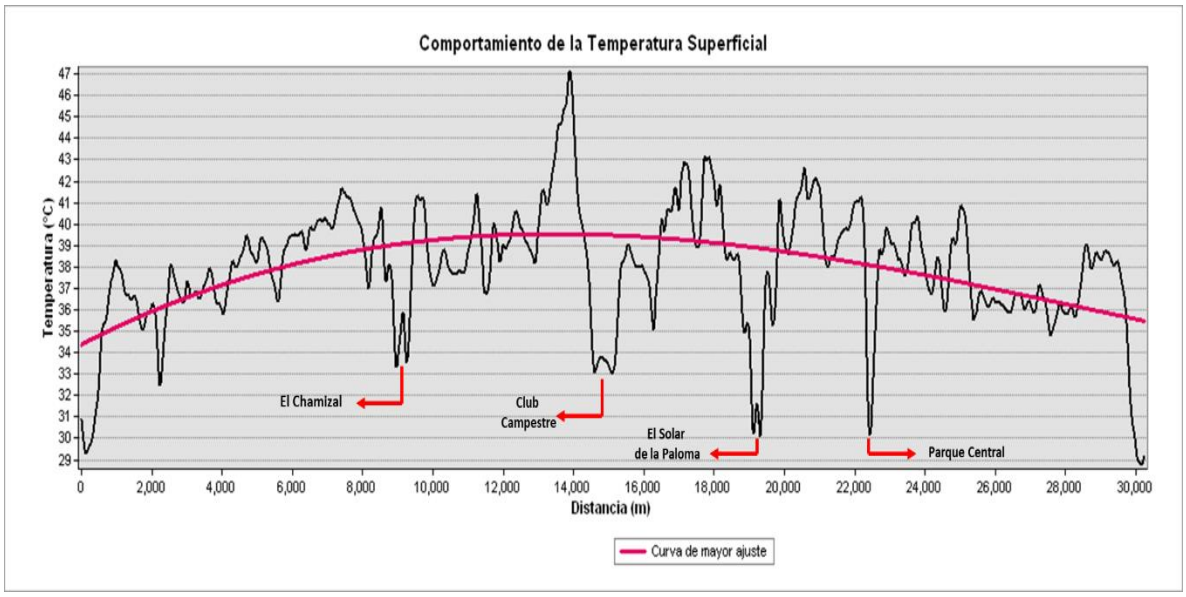
Mapa de temperatura de superficie estimado para el área urbana de Ciudad Juárez (Derivado de Landsat 8 OLI-TIRS).



Nota. Elaboración propia en ArcMap 10.8.1

Figura 7

Gráfica de las temperaturas registradas en el transecto (30 km) trazado para el análisis de los resultados obtenidos.



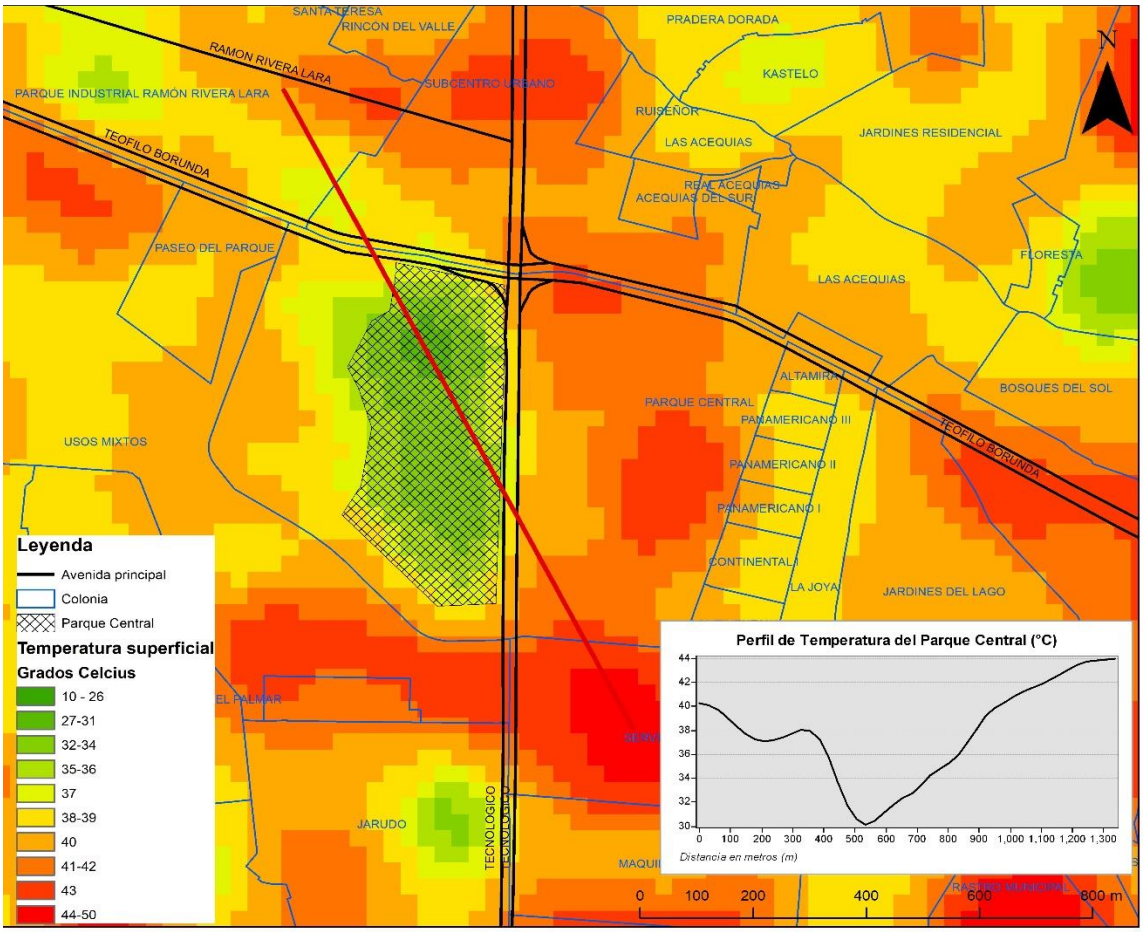
Nota. Elaboración propia en ArcMap 10.8.1.

3.2. Temperatura de superficie alrededor del Parque Central

En el transecto trazado en el Parque Central se observa en la Figura 8 y en cuya gráfica de perfil de temperatura correspondiente se aprecia el fenómeno PCI. Nótese a lo largo de la trayectoria del transecto, la temperatura ronda los 40º C y conforme se aproxima al Parque Central por el norponiente, se aprecia un decremento hasta alcanzar una temperatura de 30°C, para después, conforme la trayectoria se dirige al suroriente del parque, las temperaturas se elevan hasta los 43° C. Estos resultados muestran que este parque y sus cuerpos de agua proveen un servicio ambiental importante de PCI, logrando regular la temperatura hasta en 13° C.

Figura 8

Cálculo de temperatura en superficie del Parque Central en Ciudad Juárez (Derivado de Landsat 8 OLI-TIRS).



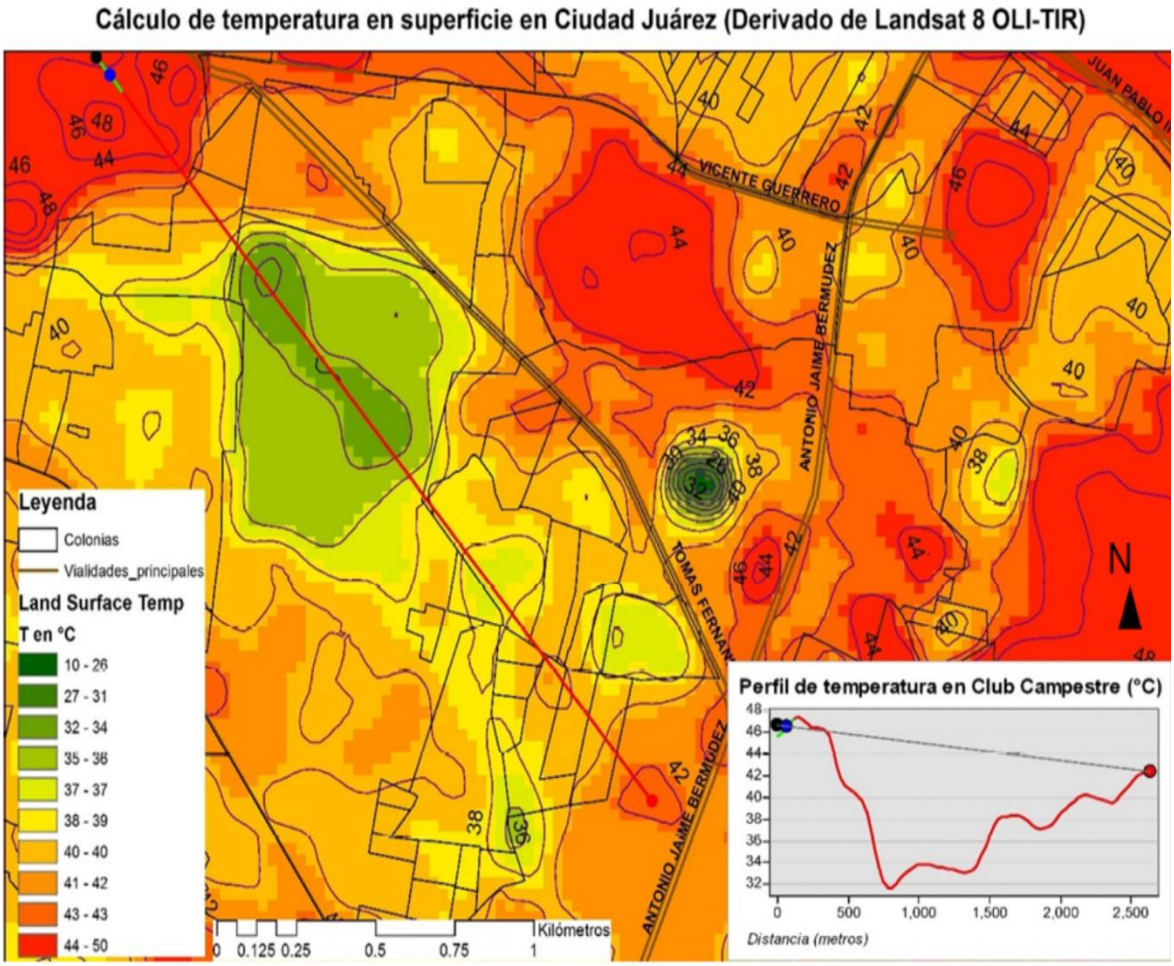
Nota. Elaboración propia en ArcMap 10.8.1.

3.3. Temperatura de Superficie alrededor del Club Campestre

Analizando la distribución espacial de las temperaturas de superficie en el área cercana y dentro del Club Campestre, se encontraron temperaturas en zonas vecinas al norponiente de hasta 48° C, disminuyendo en la trayectoria hacia el club a los 32° C dentro de una gran zona del campo de golf (Figura 9), caracterizado por alta cobertura de pastos, cuerpos de agua y árboles. En este caso se logra abatir la temperatura hasta en 16° C.

Figura 9

Cálculo de temperatura en superficie del Club Campestre en Ciudad Juárez (Derivado de Landsat 8 OLI-TIRS).



Nota. Elaboración propia en ArcMap 10.8.1.

3.4. PCI en el Club Campestre y Parque Central

Al calcular el PIC en los EVU Club Campestre y Parque Central se encontraron diferencias de temperatura de hasta 5.4° y 6.06° C, respectivamente, entre la temperatura dentro del EVU y la temperatura superficial a 500 m de distancia desde el límite del área (Tabla 3).

Tabla 3

Resultados del cálculo del PCI en el Club Campestre y Parque Central en Ciudad Juárez.

Parque	Mín (°C)	Máx (°C)	Promedio (°C)	PCI promedio (°C)
Club Campestre	31.48	39.53	35.31	5.4
Parque Central	29.96	38.78	33.97	6.06

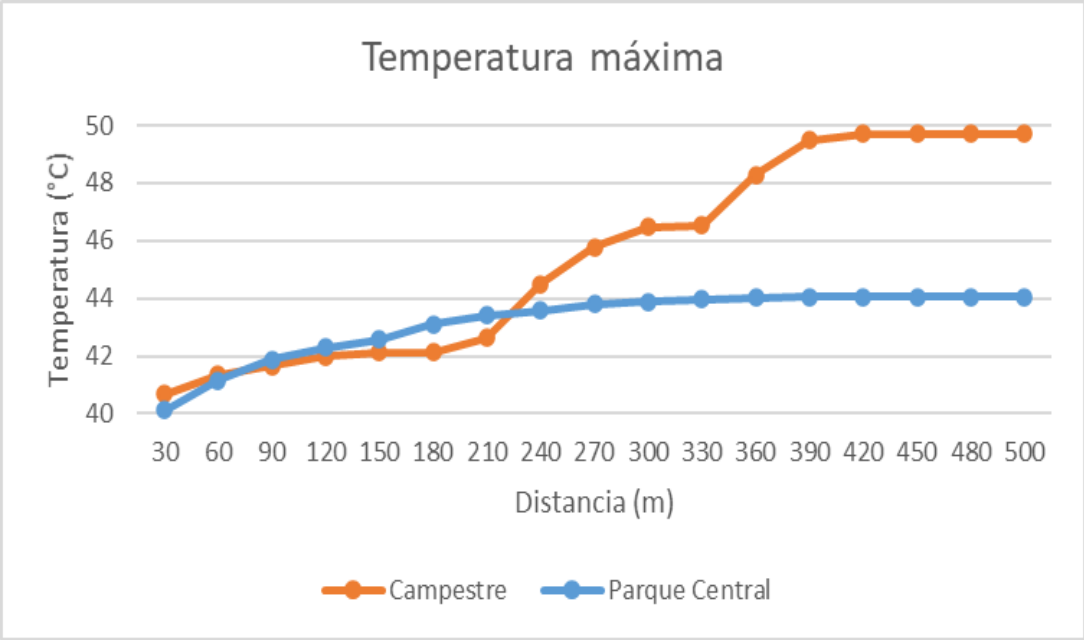
Nota. elaboración propia

Las figuras 10 y 11 muestran el comportamiento de la temperatura alrededor de las áreas del Club Campestre y el Parque Central, registrando las temperaturas en zonas de influencia cada 30 m hasta alcanzar los 500 m de distancia de los límites de las áreas verdes.

En los alrededores del Club Campestre se obtuvieron temperaturas máximas de hasta 40.69° C a los 30 m de distancia y 49.71° C en el límite de los 500 m. Respecto a la temperatura media, los resultados arrojan valores de 38.22° C a los 30 m y 40.71° C a los 500 m de distancia del límite del área verde del campo de golf. En el caso del Parque Central, las temperaturas máximas en el área de influencia llegaron hasta los 40.12° y 44.04° C, a los 30 m y 500 m de distancia, respectivamente; y las temperaturas medias obtenidas fueron 37.68° C en los primeros 30 m de distancia y 40.03° C a los 500 m. En ambos casos, y como se esperaría, las temperaturas medias y máximas aumentan conforme la distancia se aleja del área del parque.

Figura 10

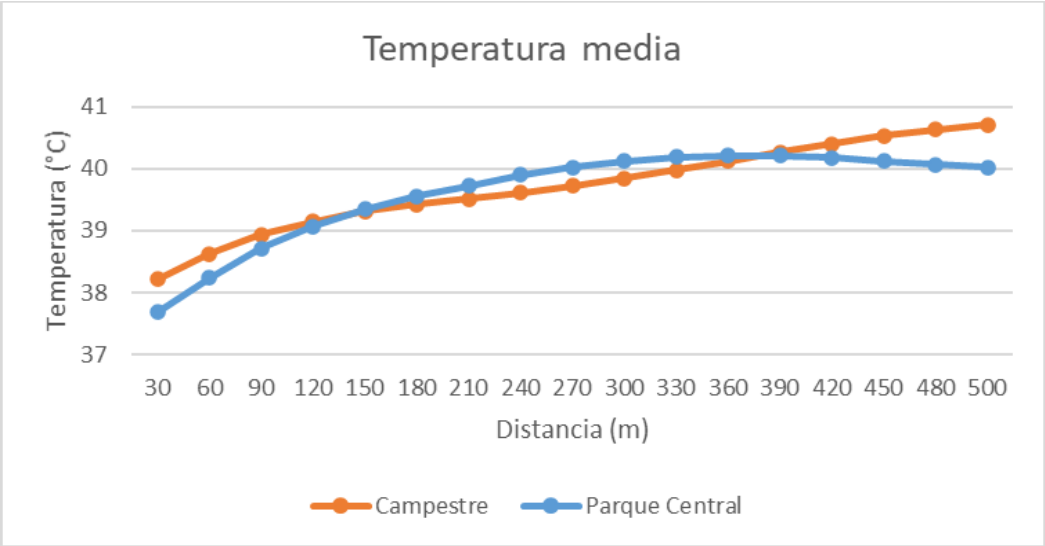
Comparación del comportamiento de la temperatura máxima registrada en el área de influencia 500 m alrededor de las áreas del Club Campestre y el Parque Central.



Nota. Elaboración propia.

Figura 11

Comparación del comportamiento de la temperatura media registrada en el área de influencia 500 m alrededor de las áreas del Club Campestre y el Parque Central.



Nota. Elaboración propia.

4. Discusión

El propósito de esta investigación fue estimar la temperatura en superficie medida con sensores remotos y con una imagen del Satélite Landsat 8 que registró una escena de Ciudad Juárez a las 5:39 pm del día 9 de junio del año 2020, esto es, un día representativo de las altas temperaturas de la ciudad, despejado y sin viento. Al efecto, es necesario recordar que no debe pasarse por alto que los resultados encontrados se limitan a la temperatura en superficie y que no reflejan la temperatura del aire físicamente censada por las personas.

En específico, los hallazgos muestran que en las zonas más vegetadas de la ciudad los gradientes térmicos son más pronunciados. Al efecto, se destaca la utilidad de la sensibilidad remota como recurso versátil y de bajo costo para estas estimaciones. La zona de El Chamizal, originalmente un parque federal ahora a cargo de la autoridad municipal, conforma una superficie de 325 ha, de las cuales 80 ha son de vegetación, su considerable magnitud y su situación geográfica binacional merecería un estudio termal aparte. Por lo que respecta al Club Campestre y El Solar de la Paloma, comprende un campo de golf la primera, y vivienda de sectores residenciales socioeconómicamente altos en ambos casos. Por su parte, el Parque

Central, con 12 ha de pareas verdes y cuerpos de agua, ubicado en zonas de clase socioeconómicamente medias, mostró una destacada capacidad para producir el efecto PCI.

Los beneficios potenciales y el impacto social de esta investigación se ponen de manifiesto si se toma en cuenta que el Parque Central en un espacio público de marcada inclusión social y con alta intensidad de uso, un parque urbano que registra entre 1.3 y 1.5 millones de visitas al año (Sandoval-Chávez, 2020). Con este estudio, se confirma la multifuncionalidad del Parque Central y se reafirma que es un territorio donde se tiende un puente con la naturaleza y que brinda servicios de regulación ambiental que son ampliamente apreciados por los ciudadanos, quienes además le otorgan a los multiservicios de este parque un alto valor económico (Sandoval-Chávez et al., 2022).

Los resultados de variaciones de temperatura superficial obtenidos en el ejercicio de este estudio coinciden con los cálculos de intensidad del PIC en la zona metropolitana de El Paso-Juárez realizados por Karle (2017), en los que su obtuvo gradientes térmicos de 4 a 5° C en verano y 2 a 3° C en la temporada invernal. Estos resultados pueden compararse con los obtenidos para el PCI de esta investigación, en la que las variaciones de temperatura entre los EVU y sus alrededores (hasta 500m) oscilan entre 5.4 y 6.06° C. Los resultados también están en línea con la investigación de Sandoval-Chávez (2020) relativa a temperaturas en aire en el Parque Central, en la que se encontró un promedio de PCI de 3.53º C para verano y de 1.7º C para invierno.

5. Conclusiones

Tomando en cuenta que los EVU son zonas de vegetación urbana con temperaturas más bajas que las áreas construidas a sus alrededores (Ren et al., 2013) y con los valores obtenidos, se puede afirmar que, en Ciudad Juárez, áreas como el Parque Central y el Club Campestre dan lugar, en efecto, al fenómeno PCI.

Otro aspecto para considerar es que el tamaño de los EVU es el factor más importante que afecta la intensidad del fenómeno PCI, ya que los EVU de alta escala tienen mayores efectos de enfriamiento que los más pequeños (Wang et al., 2022; Zhibin et al., 2014).

Este estudio puede ser considerado como una parte del análisis necesario para definir estrategias de diseño y planeación urbana, haciendo uso de los sensores remotos para considerar acciones necesarias con el objetivo de lograr un decremento en la temperatura superficial. Lo anterior implicaría la reducción del número de superficies artificiales y un reverdecimiento de espacios (Wang et al., 2022; Middel et al., 2015; Renard et al., 2019). Además, la integración de áreas y estructuras naturales en el entorno urbano fortalece la relación con la naturaleza y mejora la calidad de vida de los habitantes, lo que se acrecienta cuando los EVU urbanos en zonas áridas son gestionadas con criterios de sustentabilidad (Sandoval-Chávez, 2020; Cranz y Boland, 2004).

Considerando la ciudad en general, en lo futuro sería posible generar un modelo de PCI si se registrara, por ejemplo, un transecto que inicie y termine en la Sierra de Juárez, o bien terminando en el Valle de Juárez, donde existe vegetación, cruzando por la heterogeneidad del territorio urbano con extensas zonas sin pavimentación, zonas pavimentadas y de grandes vialidades, así como los grandes parques urbanos.

Esta investigación estuvo limitada a considerar la imagen de un día de intenso calor en Ciudad Juárez, para futuros trabajos se recomienda un monitoreo continuo del fenómeno PCI, lo que potencialmente revelaría su comportamiento con un enfoque longitudinal. Además, el conocimiento de la acción termorreguladora de los EVU resaltaría la importancia de estos espacios como elementos decisivos para mitigar la UHI en las ciudades áridas, donde la vegetación y la precipitación pluvial son escasas. También se recomienda el contraste de estudios del ambiente térmico en la ciudad con técnicas de sensibilidad remota y SIG, así como con mediciones de temperatura en aire. Este abordaje revelaría las diferencias, así como las ventajas y desventajas de cada método.

En la antigüedad el ser humano interactuaba de manera intensa con la naturaleza (Casado-Galván, 2010). En la actualidad, el espacio público, principalmente los EVU evocan la esencia primaria del ser humano en las ciudades y son uno de los armonizadores más efectivos de las urbes, brindando beneficios medioambientales, sociales y económicos (Roldán y Godoy, 2017). El estudio de la función reguladora de los EVU no solo es una temática pertinente en las ciudades de clima árido y extremo, como lo es Ciudad Juárez, sino que además abona a resaltar la importancia de los EVU, con lo que se aspira a su recuperación, proliferación y reforzamiento como territorios de bienestar para los habitantes de la ciudad.

Referencias

Akbari, H. (2002). Shade trees reduce building energy use and CO2 emissions from power plants. *Environmental Pollution*, *116*(SUPPL. 1), S119–S126. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00264-0

Amani-Beni, M., Zhang, B., Xie, G., y Xu, J. (2018). Impact of urban park's tree, grass and waterbody on microclimate in hot summer days: A case study of Olympic Park in Beijing, China. *Urban Forestry y Urban Greening*, *32*, 1–6. https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2018.03.016

Armson, D., Rahman, M. A., y Ennos, A. R. (2013). A comparison of the shading effectiveness of five different street tree species in Manchester, UK. *Arboriculture and Urban Forestry*, *39*(4), 157–164.

Avdan, U., y Jovanovska, G. (2016). Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data. *Journal of Sensors*, *2016*. https://doi.org/10.1155/2016/1480307

Azevedo, J. A., Chapman, L., Muller, C. L., Bechtel, B., Keramitsoglou, I., Kotthaus, S., Voogt, J. A., Zakšek, K., Müller, R., y Thenkabail, P. S. (2016). Quantifying the Daytime and Night-Time Urban Heat Island in Birmingham, UK: A Comparison of Satellite Derived Land Surface Temperature and High Resolution Air Temperature Observations. *Remote Sensing 2016, Vol. 8, Page 153*, *8*(2), 153. https://doi.org/10.3390/RS8020153

Brown, R. D., Vanos, J., Kenny, N., y Lenzholzer, S. (2015). Designing urban parks that ameliorate the effects of climate change. *Landscape and Urban Planning*, *138*, 118–131. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.02.006

Carlson, T. N., y Ripley, D. A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, *62*(3), 241–252. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00104-1

Casadei, P., Semmartin, M., y Garbulsky, M. F. (2021). Análisis regional de las islas de calor urbano en la Argentina. *Ecología Austral*, *31*(1), 190–203. https://doi.org/10.25260/EA.21.31.1.0.970

Casado-Galván, I. (2010). Apuntes sobre el origen y la historia de la ciudad. *Servicios Académicos Intercontinentales SL*, 6. www.eumed.net/rev/cccss/07/icg2.pdf

Chang, C. R., Li, M. H., y Chang, S. D. (2007). A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks. *Landscape and Urban Planning*, *80*(4), 386–395. https://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2006.09.005

Cranz, G., y Boland, M. (2004). Defining the Sustainable Park: A Fifth Model for Urban Parks. *Landscape Journal*, *23*(2), 102–120. https://doi.org/10.3368/lj.23.2.102

Dash, P., Göttsche, F. M., Olesen, F. S., y Fischer, H. (2010). Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: Theory and practice-current trends. *International Journal of Remote Sensing*, *23*(13), 2563–2594. https://doi.org/10.1080/01431160110115041

Díaz Vázquez, J., y Curiel Ballesteros, A. (2012). Bosques urbanos para enfriar las ciudades. *Ciencia - Academia Mexicana de Ciencias*, *63*(4), 36–41.

Flynn, L. P., Harris, A. J. L., y Wright, R. (2001). Improved identification of volcanic features using Landsat 7 ETM+. *Remote Sensing of Environment*, *78*(1–2), 180–193. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00258-9

García-Haro, Alan, Arellano, ;, Blanca, y Roca, J. (02-04 de octubre de 2019). *Variaciones estacionales del efecto de enfriamiento de los parques urbanos de Barcelona: una aproximación mediante teledetección*. XIII CTV 2019 Proceedings: XIII International Conference on Virtual Cityand Territory: "Challenges and Paradigms of the Contemporary City": UPC, Barcelona, España. https://doi.org/10.5821/CTV.8957

García Haro, A., y Arellano Ramos, B. (2018). Isla de frío de los parques urbanos de Barcelona. Estudio de caso del Turó parc y el parc del Centre del Poblenou. En *Libro de Proceedings, CTV 2018: XII Congreso Internacional Ciudad y Territorio Virtual: "Ciudades y Territorios Inteligentes": UNCuyo, Mendoza, 5-7 Septiembre 2018*, (pp. 381–400). https://doi.org/10.5821/CTV.8253

Geoghegan, J., Lowell, P., Ogneva-Himmelberger, Y., Chowdhury, R. R., Sanderson, S., y Turner, B. L. (1998). Socializing the pixel and "pixeling the social" in land-use and land-cover change. In P. C. Liverman, Diana. Moran, Emillio F., Rindfuss, Ronald R.,Stern (Ed.), *People and Pixels. Linking Sensing and Social Sciences.* (1st., pp. 51–69). National Academy Press. https://www.nap.edu/read/5963/chapter/1

González, F. M. L., Navarro, L. A. N., Caravantes, R. E. D., y Estupiñán, J. N. (2021). Cobertura vegetal y la distribución de islas de calor/oasis urbanos en Hermosillo, Sonora. *Frontera Norte*, *33*, 1–31. https://doi.org/10.33679/RFN.V1I1.2088

González, G. P., Ramírez, L. N., Peña, D., Arias, C., y Castellanos, E. (2020). Isla de refrigeración natural de áreas verdes tropicales. Caso de estudio humedal "La Vaca." In S. Cristancho y L. Ramírez (Eds.), *Un camino a la sustentabilidad: perspectiva de la educación y la ingeniería* (1st ed., pp. 49–62). Universidad Libre de Colombia.

Hemsley, A. R., Poole, I., y Linnean Society of London. Palaeobotany Specialist Group. (2004). *The evolution of plant physiology : from whole plants to ecosystems*. Published for the Linnean Society of London by Elsevier Academic Press.

Herold, M., y Roberts, D. A. (2010). The spectral dimension in urban remote sensing. *Remote Sensing and Digital Image Processing*, *10*, 47–65. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4385-7_4

Herrera-Correa, V. M., y Romo-Aguilar, M. de L. (2021). La distribución de las áreas verdes públicas en relación con las características socioeconómicas de la población en Ciudad Juárez, México. *Acta Universitaria*, *31*. https://doi.org/10.15174/au.2021.3101

IMIP. (2021). *Radiografía Socioeconómica del municipio de Juárez 2020. Socio-economic Radiography of the Municipality of Juárez 2020.* Municipio de Juárez. Instituto Municipal de Investigación y Planeación. https://www.imip.org.mx/imip/files/radiografia/Radiografia2020-2021.pdf

Jiménez, M., Carlos, E., Cordero, D., y Monroy, V. (2018). *Sistema nacional de protección civil CENAPRED mapas de rtiesgo por temperaturas máximas (3ª etapa ondas de calor).* https://www1.cenapred.unam.mx/DIR_INVESTIGACION/Fraccion_XLI/RH/180301_RH_ondas_de_calor_mapas.pdf

Karle, N. N. (2017). Study of the Urban Heat Island and its Effect on the Planetary Boundary Layer for the El Paso-Juarez Airshed - NASA/ADS. In *AGU Falll Meeting Abstracts* (Vol. 17). https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017AGUFM.A51A2032K/abstract

Khorram, S., Nelson, S. A. C., van der Wiele, C. F., y Cakir, H. (2017). Processing and Applications of Remotely Sensed Data. In *Handbook of Satellite Applications* (pp. 1017–1046). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23386-4_92

Kustensov, A., Melnikova, I., Pozdnyakov, D., Seroukhova, O., y Vasilyev, A. (2012). *Remote sensing of the environment and radiation transfer. An introductory survey.* Springer.

Kwarteng, A., y Small, C. (2010). Remote sensing of urban environmental conditions. In *Remote Sensing and Digital Image Processing* (Vol. 10, pp. 267–287). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4385-7_14

Lara-Pulido, J. A., Guevara-Sanginés, A., y Arias Martelo, C. (2018). A meta-analysis of economic valuation of ecosystem services in Mexico. *Ecosystem Services*, *31*, 126–141. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.02.018

Li, H., Wang, G., Tian, G., y Jombach, S. (2020). Mapping and Analyzing the Park Cooling Effect on Urban Heat Island in an Expanding City: A Case Study in Zhengzhou City, China. *Land 2020, Vol. 9, Page 57*, *9*(2), 57. https://doi.org/10.3390/LAND9020057

Li, X., Ratti, C., y Seiferling, I. (2018). Quantifying the shade provision of street trees in urban landscape: A case study in Boston, USA, using Google Street View. *Landscape and Urban Planning*, *169*, 81–91. https://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2017.08.011

Manzur, A., y Cardoso, J. (2015). Velocidad de evaporación del agua. In *Eduación Revista Mexicana de Física 61*, 31-34. http://www.scielo.org.mx/pdf/rmfe/v61n1/v61n1a7.pdf

Menacho, E. E., y Teruya, S. N. (2019). Análisis de la relación de la isla de calor urbano con factores demográficos, espaciales y ambientales de Lima metropolitana usando sensores remotos. *Anales Científicos*, *80*(1), 60–75. https://doi.org/10.21704/AC.V80I1.926

Meneses, T., y Iral, P. (2017). *Análisis espacio-temporal de variables que inciden en la generación de isla de calor urbana en la localidad de Kennedy*. Universidad Santo Tomás.

Middel, A., Chhetri, N., y Quay, R. (2015). Urban forestry and cool roofs: Assessment of heat mitigation strategies in Phoenix residential neighborhoods. *Urban Forestry and Urban Greening*, *14*(1), 178–186. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.09.010

Oke, T. R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment (1967)*, *7*(8), 769–779. https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6

Oke, T. R., Crowther, J. M., McNaughton, K. G., Monteith, J. L., y Gardiner, B. (1989). The Micrometeorology of the Urban Forest [and Discussion]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *324*(1223), 335–349. https://doi.org/10.1098/rstb.1989.0051

Ren, Z., He, X., Zheng, H., Zhang, D., Yu, X., Shen, G., y Guo, R. (2013). Estimation of the Relationship between Urban Park Characteristics and Park Cool Island Intensity by Remote Sensing Data and Field Measurement. *Forests*, *4*(4), 868-886. https://doi.org/10.3390/F4040868

Renard, F., Alonso, L., Fitts, Y., Hadjiosif, A., y Comby, J. (2019). Evaluation of the Effect of Urban Redevelopment on Surface Urban Heat Islands. *Remote Sensing*, *11*(3), 299. https://doi.org/10.3390/RS11030299

Roldán, D., y Godoy, S. (2017). Antes del espacio público: una historia de los espacios verdes y libres de la ciudad de Rosario (1900-1940). *Cadernos de História*, *18*(28), 150. https://doi.org/10.5752/P.2237-8871.2017v18n28p150

Roloff, A., Korn, S., y Gillner, S. (2009). The Climate-Species-Matrix to select tree species for urban habitats considering climate change. *Urban Forestry and Urban Greening*, *8*(4), 295–308. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2009.08.002

Romero Aravena, H., Mendonça, M., Méndez Díaz, M., y Smith Guerra, P. (2011). Multiescalaridad, relaciones espaciales y desafíos ecológico-sociales de la climatología sudamericana. El caso del Desierto de Atacama. *Revista Brasileira de Climatologia*. http://biblioteca.cehum.org/handle/123456789/632

Roy, S., Byrne, J., y Pickering, C. (2012). A systematic quantitative review of urban tree benefits, costs, and assessment methods across cities in different climatic zones. In *Urban Forestry and Urban Greening*, *11*(4), 351-363. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.06.006

Sandoval-Chávez, D. A. (2020). *Modelo Sistémico de Evaluación de la Sustentabiliad de Parques Urbanos y su Apliacación en el Parque Central Hermanos Escobar de Ciudad Juárez* [Disertación Doctoral. El Colegio de Chiahuahua. México]. http://www.colech.edu.mx/cont/tesis/dsandoval.pdf

Sandoval-Chávez, D. A., Reyes-Escalante, A. R., y Rodríguez, M. A. (2022). Estimación del valor económico de un parque urbano. Un enfoque sistémico. *Revista de Economía, Facultad de Economía, Universidad Autónoma de Yucatán*, *39*(99), 2022. https://doi.org/10.33937/REVECO.2022.276

Schowengerdt, R. A. (1997). *Remote sensing: models and methods for image processing*. Academoic Press.

Shashua-Bar, L., Pearlmutter, D., y Erell, E. (2009). The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate. *Landscape Urban Plan*, *92*(3–4), 179–186. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.04.005

Stabler, L. B., Martin, C. A., y Brazel, A. J. (2005). Microclimates in a desert city were related to land use and vegetation index. *Urban Forestry y Urban Greening*, *3*(3–4), 137–147. https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2004.11.001

Urrutia, E. (2020). *Problemática de áreas verdes en Ciudad Juárez: perspectivas y soluciones a corto y largo plazo.* Entrevista a profundidad con el titular de la Subdirección de Parques y Jardines, Ciudad Juárez.

Wang, C., Ren, Z., Dong, Y., Zhang, P., Guo, Y., Wang, W., y Bao, G. (2022). Efficient cooling of cities at global scale using urban green space to mitigate urban heat island effects in different climatic regions. *Urban Forestry and Urban Greening*, *74*. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127635

Xie, Q., y Li, J. (2020). Detecting the Cool Island Effect of Urban Parks in Wuhan: A City on Rivers. *International Journal of Environmental Research and Public Health 2021, Vol. 18, Page 132*, *18*(1), 132. https://doi.org/10.3390/IJERPH18010132

Zhang, L., Wei, D., Hou, Y., Du, J., Liu, Z., Zhang, G., y Shi, L. (2020). Outdoor Thermal Comfort of Urban Park—A Case Study. *Sustainability*, *12*(5), 1961. https://doi.org/10.3390/SU12051961

Zhanga, Y., Odeh, I. O. A., y Ramadan, E. (2013). Assessment of land surface temperature in relation to landscape metrics and fractional vegetation cover in an urban/peri-urban region using landsat data. *International Journal of Remote Sensing*, *34*(1), 168–189. https://doi.org/10.1080/01431161.2012.712227

Zhibin, R., Haifeng, Z., Xingyuan, H., Dan, Z., y Xingyang, Y. (2014). Estimation of the Relationship Between Urban Vegetation Configuration and Land Surface Temperature with Remote Sensing. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, *43*(1), 89–100. https://doi.org/10.1007/S12524-014-0373-9