

## La vegetación como reguladora del clima urbano: el caso del Área Metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México

### *Vegetation as a regulator of urban climate: the case of the Guadalajara Metropolitan Area, Jalisco, Mexico*

Tonantzin Camacho Sandoval,\* Víctor Orlando Magaña Rueda,\*\* Silvia Lizette Ramos de Robles\*\*\*  
y Juan Alberto Gran Castro§

Recibido: 23/01/2024. Aceptado: 22/04/2024. Publicado: 14/06/2024.

**Resumen.** El crecimiento de las áreas urbanas ha provocado deforestación y con ello la pérdida del servicio de regulación climática, que generalmente resultan en aumentos de la temperatura. El calentamiento urbano, producto de dicha deforestación, puede resultar en peligros para la salud y la calidad de vida de la población. Al igual que otras ciudades de México y el mundo, el Área Metropolitana de Guadalajara (AMG) se ha caracterizado por un rápido crecimiento demográfico y urbano con pérdidas de vegetación que inducen la formación de Islas de Calor Urbana (ICU). Mediante el uso del Índice Mejorado de Vegetación (EVI, por sus siglas en inglés), se evalúa la densidad de vegetación y sus cambios en décadas recientes en el AMG. Se encuentra que, entre 1980 y 2020, la vegetación decrece. Dicho cambio en el uso de suelo ha generado una ICU y con ello la pérdida de confort climático para la gente, con un aumento de entre 2 y 3°C en el AMG. La ICU aumenta las probabilidades de llegar a condiciones de confort consideradas peligrosas. Utilizando el Índice de Calor (IC), calculado a partir de

datos de temperatura y humedad atmosférica de superficie, se encuentra que las probabilidades de que éste rebase los 30°C ha aumentado en alrededor de 10% en 30 años, principalmente al oriente del AMG, lo que equivale a casi un mes adicional con condiciones fuera del rango de confort consideradas adecuadas. En el Municipio de Guadalajara, se tiene carencia de áreas verdes por lo que esta urbe no puede ser considerada una ciudad saludable, de acuerdo con los criterios de la ONU. Por ello, la política ambiental del AMG urbana debe llevar a la recuperación y protección de la vegetación y los servicios ecosistémicos.

**Palabra clave:** deforestación, áreas urbanas, calidad de vida, islas de calor.

**Abstract:** The growth of urban areas has led to deforestation and consequently the loss of climatic regulation service, which typically results in temperature increases. Urban

\* Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Cam. Ramón Padilla Sánchez 2100, Las Agujas, 44600, Zapopan, Jalisco, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3977-8051>. Email: [tona.camacho@gmail.com](mailto:tona.camacho@gmail.com)

\*\* Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía. Circuito de la Investigación Científica, 04510, Ciudad de México, CDMX, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7497-210X>. Email: [victormr@unam.mx](mailto:victormr@unam.mx)

\*\*\* Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Cam. Ramón Padilla Sánchez 2100, Las Agujas, 44600, Zapopan, Jalisco, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3080-8209>. Email: [lizette.ramos@academicos.udg.mx](mailto:lizette.ramos@academicos.udg.mx). Autor de correspondencia.

§ Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Económico Administrativas. Periférico Norte N° 799, Núcleo Universitario Los Belenes, 45100, Zapopan, Jalisco, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0871-2443>. Email: [juan.gran@ucea.udg.mx](mailto:juan.gran@ucea.udg.mx)

warming, a product of this deforestation, can pose hazards to public health and quality of life. Like other cities in Mexico and globally, the Guadalajara Metropolitan Area (GMA) has been characterized by rapid demographic and urban growth with vegetation losses that induce the formation of Urban Heat Islands (UHIs). Using the Enhanced Vegetation Index (EVI), vegetation density and its changes over recent decades in the GMA are evaluated. It is observed that vegetation has decreased between 1980 and 2020. This land use change has generated a UHI and consequently the loss of climatic comfort for the population, with an increase of 2 to 3°C in the GMA. The UHI raises the probabilities of reaching conditions of comfort deemed perilous. By employing the Heat Index (HI), computed from surface temperature and

atmospheric humidity data, it is found that the probabilities of it exceeding 30°C have risen by around 10% in 30 years, primarily in the eastern part of the GMA, equivalent to almost an extra month of conditions outside the range of comfort considered appropriate. In the Municipality of Guadalajara, there is a deficiency in green areas, therefore, this urban area cannot be deemed a healthy city according to UN criteria. Consequently, the environmental policy of urban GMA must lead to the recovery and protection of vegetation and ecosystem services.

**Keywords:** deforestation, urban areas, quality of life, heat islands.

## INTRODUCCIÓN

Las zonas urbanas ocupan menos del 1% de la superficie terrestre y en ellas habita más de la mitad de la población (UNDP, 2020). En 1950, el 70% de los habitantes del planeta vivía en asentamientos rurales, pero en 2007 la población urbana superó a la población rural (ONU, 2020). La Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2020) estima que para el 2050 el porcentaje de personas en zonas urbanas se incrementará al 68% y, por ende, el desarrollo sostenible y la calidad de vida en las ciudades será menos probable. Esta situación dependerá de la planeación urbana, especialmente en los países de ingresos medios y bajos. En 2020, en México, el 79% del total de la población habitaba en zonas urbanas y se estima que para 2030 llegue a 83% (INEGI, 2020), por lo que planear el crecimiento de las ciudades es de gran importancia.

La demanda creciente de vivienda e infraestructura es frecuentemente satisfecha con la expansión urbana, proceso que implica la eliminación de vegetación natural y una reducción en los servicios ecosistémicos (por ej., Mohammadyari *et al.*, 2023). En México, el modelo de crecimiento de las ciudades ha tenido esta dinámica, con pérdida de servicios de regulación, entre los cuales están un menor almacenamiento de carbono (por ej., Guillen-Cruz *et al.*, 2021), una disminución en la modulación de la actividad de eventos meteorológicos extremos (por ej., López *et al.*, 2020) y una tendencia a un cambio climático a niveles peligrosos (por ej., Behzadi, *et al.*, 2020). En consecuencia, la pérdida del paisaje natural, particu-

larmente el de las áreas vegetadas, ha modificado el clima urbano (Oke *et al.*, 2017), induciendo un aumento en los eventos meteorológicos, como las ondas de calor (IPCC, 2001; Jáuregui, 2009; Lu *et al.*, 2023). Gracias al trabajo de Jáuregui (por ej., 2004) se sabe que las ciudades mexicanas de más de un millón de habitantes generan Islas de Calor Urbanas (ICU) que se crecen en el espacio y se intensifican con el tiempo, hasta convertirse en un peligro para sus habitantes.

La llamada infraestructura verde de las zonas urbanas es una red planificada de zonas naturales y seminaturales de gran calidad que, entre otras cosas, está diseñada y gestionada para brindar una amplia gama de servicios ecosistémicos que ayudan a proteger la biodiversidad en los entornos urbanos (Comisión Europea, 2013). Con la formación de una ICU, se deteriora dicha infraestructura verde. El AMG ha perdido verdor y con ello servicios ecosistémicos de regulación climática (Camacho-Sandoval, 2022).

Desde finales del siglo XX, Ernesto Jáuregui (1987, 1997) documentó la formación de una ICU sobre el AMG como consecuencia de una urbanización en aumento. La ICU del AMG ha aumentado los episodios de calor intenso y ha producido cambios en el ciclo hidrológico local (López *et al.*, 2022), con una tendencia a lluvias intensas cada vez más frecuentes en una ciudad vulnerable, lo que ha incrementado el riesgo y la ocurrencia de inundaciones urbanas.

A pesar de los cambios en su clima, el AMG también constituye un espacio de oportunidad para implementar medidas y estrategias de gestión de riesgo climático basadas en la naturaleza (Jiménez, 2022),

en donde la recuperación de la infraestructura verde juega un papel importante. Algunos estudios sobre mitigación de ICU muestran que los servicios ecosistémicos permiten mitigar cambios en el clima urbano con diversos cobeneficios para la salud (Colunga *et al.*, 2015; Chen *et al.*, 2019). Tanto la mitigación, como la adaptación al cambio climático se puede hacer a partir de la recuperación y consolidación de la infraestructura verde, mejorando la sostenibilidad urbana y la salud de los socioecosistemas (Salmond *et al.*, 2016). Sin embargo, se requieren estrategias para mostrar que la recuperación de los servicios ecosistémicos urbanos puede llegar a niveles que den como resultado ciudades saludables (Pineo *et al.*, 2018). La recuperación de la infraestructura verde permitirá reducir el riesgo climático, al reducir peligros y vulnerabilidad.

La infraestructura verde en entornos urbanos embellece las ciudades, pero principalmente desempeña un rol crucial en la mitigación del cambio climático (Venn y Niemela, 2004). El arbolado proporciona color y belleza escénica a las ciudades y reduce los peligros de las ICU (Cruz-Sandoval *et al.*, 2020; Ziter *et al.*, 2019; Duncan *et al.*, 2019), resultado de un aumento en la presencia de asfalto, concreto, acero o vidrio (Schwaab *et al.*, 2021). Las áreas urbanas con árboles y pastos reducen las temperaturas de dos a cuatro veces en comparación con los espacios urbanos sin vegetación (Cruz-Sandoval *et al.*, 2020; Schwaab *et al.*, 2021).

Zonas como el AMG enfrentan problemas derivados de la pérdida de vegetación e intensificación de las ICU (Jáuregui *et al.*, 1992; Alamilla y Davydova, 2020). A finales de la primavera y principios del verano, las temperaturas alcanzan más de 38 °C hacia el este del AMG, con ondas de calor, como en el caso de junio 2005, cuando hubo once muertos en el estado de Jalisco por dicha condición meteorológica (Curiel, 2014). En años más recientes, como en junio 2023, el intenso calor llegó a casi 40 °C de temperatura máxima.

Las estrategias para gestionar el riesgo ante el cambio climático en grandes urbes deben considerar mitigar la ICU. Hacerlo implica estimar cuánto se mitiga con acciones como la reforestación urbana. En el marco de este planteamiento, el objetivo del presente trabajo es diagnosticar las caracterís-

ticas y la dinámica de la infraestructura verde del AMG entre el 2000 y el 2018 y su relación con las condiciones de confort climático. La valoración de las relaciones infraestructura verde y confort térmico permitirá proponer acciones para que el AMG pueda considerarse una ciudad saludable.

## DATOS Y METODOLOGÍA

El AMG es la urbe más extensa del estado de Jalisco, y se localiza en el occidente de México (Figura 1). Abarca las zonas conurbadas de nueve municipios y se extiende sobre 62 645 hectáreas donde viven aproximadamente 5 268 642 habitantes (IIEG, 2020).

Para estimar la infraestructura verde en el AMG se calculó la densidad de áreas verdes por habitante con base en el último censo de INEGI (2020), y los siguientes instrumentos de planeación urbana: los Programas Municipales de Desarrollo Urbano (PMDU), los Planes Parciales de Desarrollo Urbano (PPDU) y Planes de Desarrollo Urbano de Centro de Población (PDUCEP), información obtenida de Open Street Map, incluyendo información de glorietas y camellones de las cartas topográficas 1:20 000 de INEGI y de las áreas naturales protegidas (federales, estatales y municipales; IIEG, 2018).

La evolución de la infraestructura verde del AMG, y del municipio de Guadalajara en particular, también se documentó a través de información del Índice Mejorado de Vegetación (EVI, por sus siglas en inglés), provisto por el satélite MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (GSFC, 2022) y de Landsat. Este índice tiene una resolución espacial de 250 metros x 250 metros, con compuestos que abarcan 16 días para el periodo de 2000 a 2019 (<https://www.climateengine.org>).

Para caracterizar las condiciones climáticas del AMG se utilizaron datos diarios de temperatura máxima, mínima y precipitación en estaciones dentro y fuera del AMG para el periodo 1960-2018 de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), disponibles en <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia>. También se utilizaron datos horarios de la red de monitoreo de la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (SEMADET) del estado de Jalisco, de diez estaciones ubicadas en el

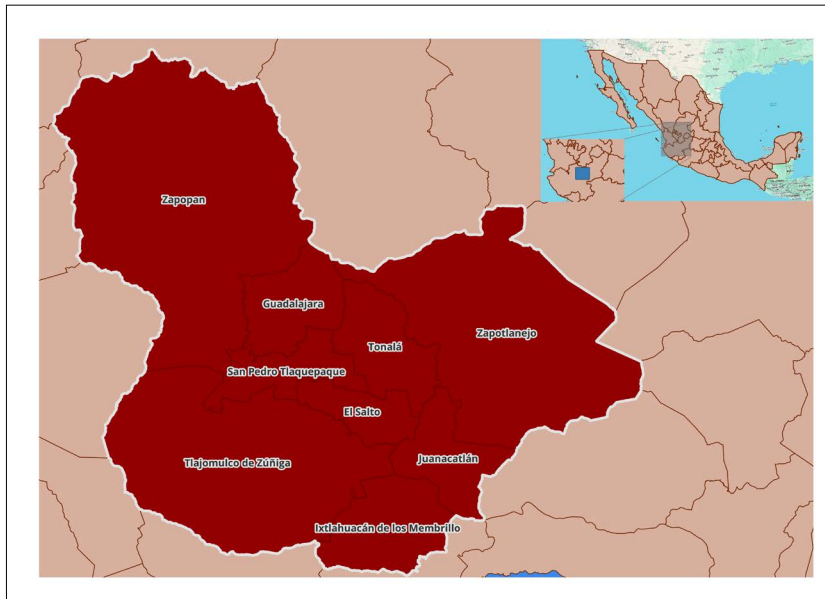


Figura 1. Municipios del Área Metropolitana de Guadalajara al occidente de México. Fuentes: elaboración propia con datos de INEGI (2020) e IIEG (2020).

AMG en donde además de temperatura se monitorea humedad y viento.

Los datos meteorológicos diarios y horarios del AMG se interpolaron a una malla regular de 4 km x 4 km usando un esquema de Cressman (1959). Las mallas de campos meteorológicos corresponden a los datos proporcionados por Magaña (comunicación personal 2023). Con los campos de temperatura y humedad se calculó el Índice de Calor (IC) para el AMG para el periodo 2000-2018, siguiendo la propuesta de la Agencia del Océano y la Atmósfera de los Estados Unidos (NOAA, 2022) dada por la expresión:

$$\begin{aligned}
 IC = & -42.379 + 2.04901523 * T + 10.14333127 \\
 & * RH - 0.22475541 * T * RH - 0.00683783 * \\
 & T * T - 0.05481717 * RH * RH + 0.00122874 \\
 & * T * T * RH + 0.00085282 * T * RH * RH - \\
 & 0.00000199 * T * T * RH * RH
 \end{aligned}$$

donde T es la temperatura en grados Fahrenheit (°F) y RH el valor de la humedad relativa en porcentaje (%). Para fines de claridad, el IC se expresó en grados Celsius.

Mediante un esquema de correcciones sucesivas (Cressman, 1959), se calcularon campos diarios de IC para el AMG en mallas regulares.

También se analizaron datos de la temperatura del suelo (LST, por sus siglas en inglés), a partir de imágenes de la plataforma Landsat (<https://www.climateengine.org>) con características espaciales y temporales similares a los de EVI. El análisis se complementó con un muestreo corto (de tres días de las horas en que se alcanza la temperatura máxima) en puntos cercanos a un parque urbano, para de esta manera estimar el efecto que tiene el arbolado y la cobertura de suelo en la temperatura, humedad y velocidad del viento. Las mediciones se realizaron en el área aledaña al bosque urbano Los Colomos, al noreste del municipio de Guadalajara. Las mediciones se realizaron durante tres horas en cinco puntos separados por 500 metros que se alejan radialmente del parque, cada diez minutos, entre el 13 y el 15 de marzo del 2022, de las 15:00 a las 17:00 hrs.

## RESULTADOS

### a) Urbanización e infraestructura verde en el AMG

La expansión del AMG en décadas recientes (2000-2020) se ha caracterizado por el cambio del uso de suelo, de zonas de vegetación natural o agrícolas, a zonas con infraestructura urbana. En el AMG las

áreas verdes se dividen en tres categorías: 1) áreas naturales protegidas (ANP), que son regiones que no han sufrido alteraciones significativas por la actividad humana y están bajo protección legal, cumpliendo funciones ecológicas cruciales; 2) espacios verdes en la zona conurbada del AMG, como parte de la planificación urbana, que abarcan áreas para recreación y aprovechamiento; y 3) bosques urbanos, definidos por el Plan de Ordenamiento Territorial Metropolitano del AMG, los cuales son considerados de alto valor ambiental y relevancia para la conservación de los ecosistemas.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) y ONU-Hábitat sugieren un mínimo de nueve metros cuadrados de espacio verde por habitante, y que todos los residentes tengan acceso a una zona verde, caminando un máximo de 15 minutos. En el AMG, el 40% de las colonias carecen de infraestructura verde suficiente. Otro 40% de las colonias poseen más de 30 metros cuadrados de áreas verdes por

habitante, pero se ubican en la periferia del AMG, en colonias aledañas a la barranca de Huentitán, en la parte norte del municipio de Guadalajara. El 20% restante de las colonias cuenta con un área verde entre 9 y 20 m<sup>2</sup>. Solo 30 colonias tienen más del 30% y hasta el 64% de su superficie con áreas verdes que corresponden principalmente a parques o zonas de vegetación natural que se conserva (Figura 2a). El uso de datos EVI para septiembre de 2020 permite identificar las zonas de mayor verdor que corresponden a la infraestructura verde señalada (Figura 2b).

En el municipio de Guadalajara, 221 colonias (78%) están por debajo del parámetro de vegetación recomendado, lo que convierte a este municipio el de mayor deficiencia de áreas verdes del AMG. En el Plan de Ordenamiento Forestal Metropolitano (POFMet) del 2018 se estimó que hay un total de 1 158 009 árboles en los espacios públicos, principalmente en vialidades y solo un número pequeño

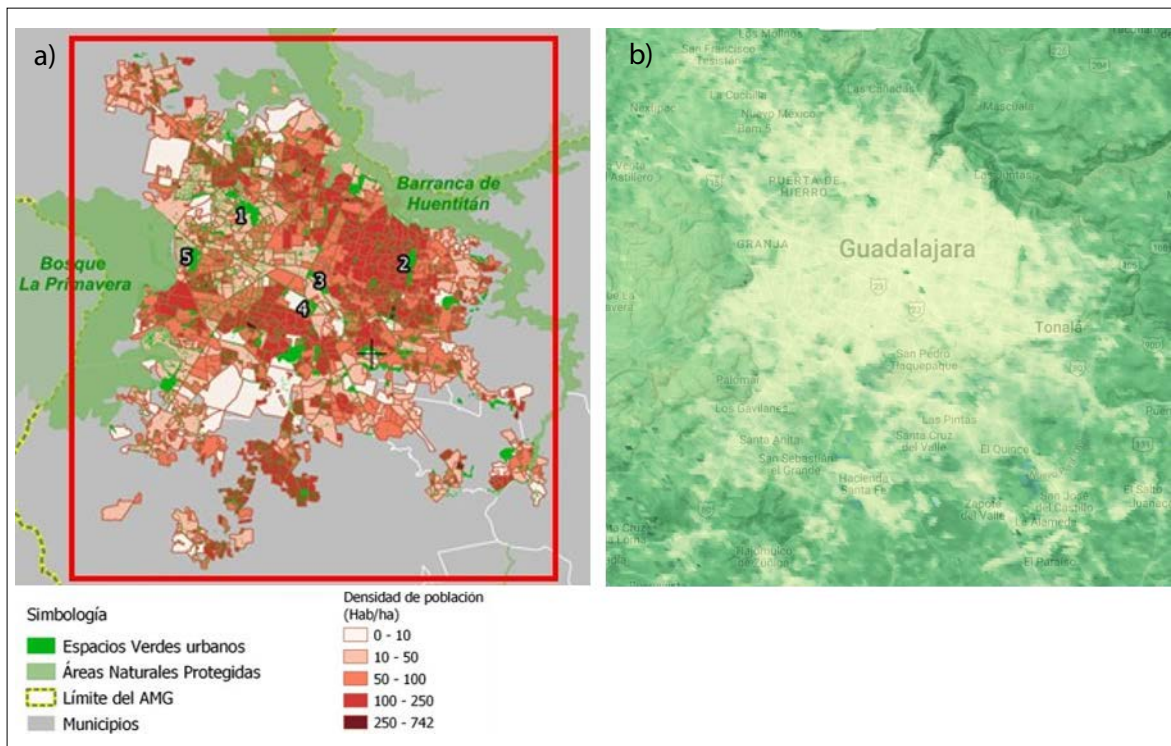


Figura. 2 a) Densidad de población y espacios verdes urbanos en el AMG a nivel colonia, y b) la condición de EVI para el mes de septiembre de 2020. Fuente: elaboración propia con INE-IEEG 2018, INEGI, 2020 y datos de MODIS obtenidos de [ClimateEngine.org](https://climateengine.org).



en parques y jardines de la zona conurbada. En este registro no se incluyen los árboles en áreas naturales protegidas, parques públicos bajo administración, propiedades privadas y zonas rurales. Así, en el municipio de Guadalajara, el 47% del arbolado urbano se ubica en espacios públicos como glorietas, camellones y banquetas, mientras que el 38% se encuentra en patios frontales y áreas verdes barriales. El 4% y el 8% respectivamente se localizan en parques y la barranca. Por último, el 2% del arbolado municipal se halla en jardines privados al interior de las casas. Las colonias con una alta densidad de población carecen de infraestructura verde y se ubican principalmente en la zona centro del AMG. En el noreste del municipio de Guadalajara se encuentra la mayor población de niños y adolescentes y, sin embargo, es un área en donde no existe suficiente arbolado urbano ni espacios verdes para su recreación. En contraste, las colonias con mayor cantidad de infraestructura verde y arbolado urbano son aquellas que cuentan con una densidad poblacional relativamente menor y un nivel socioeconómico mayor, como lo es cerca del Bosque Los Colomos, en el noroeste de Guadalajara.

La condición promedio anual del verdor, estimada a partir de datos de EVI para el periodo 1991-2000, permite identificar la zona urbanizada del AMG. Los valores de EVI menores de 0.02 corresponden a escasa vegetación, característica de

la urbanización, mientras que la periferia muestra valores de EVI mayores a 0.2, con una mayor cobertura de vegetación natural (Figura 3a). Si no se incluyen las 49 743 hectáreas correspondientes a las áreas naturales protegidas ubicadas a las orillas de la AMG, los espacios verdes tienen una superficie de 4697 hectáreas, esto es, el 7.5% del total de la superficie del AMG. En la década más reciente, 2011-2020, la superficie urbana se extiende y el verdor disminuye (Figura 3b). El AMG tiene al año 2020 (INEGI 2020) una población de 5 179 874 de personas, un área de 2551.34 km<sup>2</sup> y una densidad de población de 2145 hab./km<sup>2</sup>, siendo Zapopan (9721 hab./km<sup>2</sup>), Tonalá (4483.28 hab./km<sup>2</sup>) y El Salto (4420 hab./km<sup>2</sup>) los municipios más densamente poblados del AMG y los que mayor exposición presentan a peligros climáticos.

A partir de 1991, el AMG registró un crecimiento urbano hacia su periferia, que se caracterizó por una significativa pérdida de vegetación natural (Figura 4), por ejemplo, hacia los municipios de Tlajomulco y Tlaquepaque en el suroeste, y Tonalá en el este, con pérdida de servicios ecosistémicos, particularmente de los de regulación que lleva a una reducción del confort climático.

Comparando los cambios en la distribución espacial de valores EVI de los periodos 2000-2005 y 2017-2022 en dos estaciones, secas y lluvias, es posible identificar el cambio en la condición de

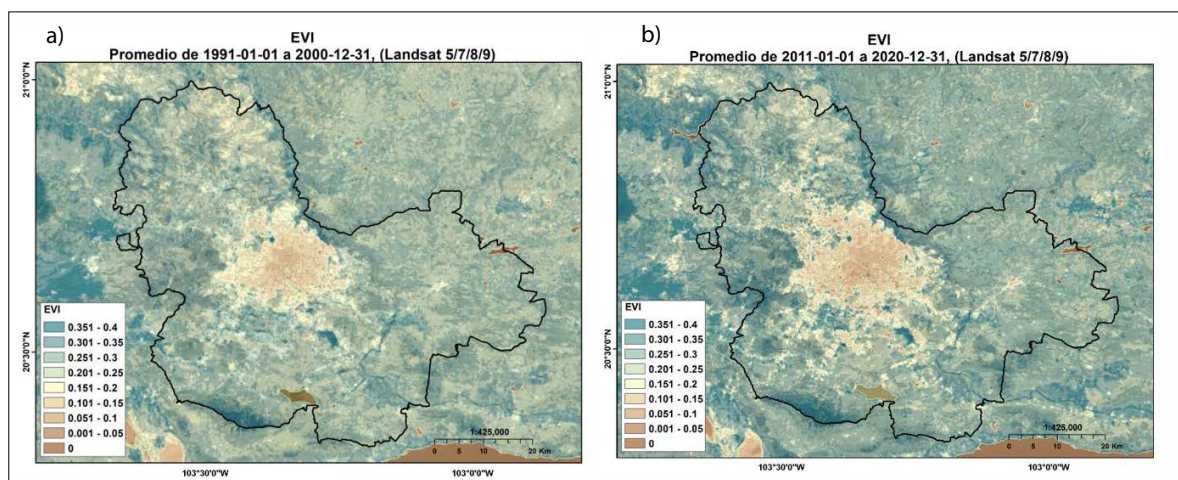


Figura 3. EVI promedio anual para el periodo a) 1991-2000 y b) 2011-2020. Fuente: elaboración propia con datos EVI de Landsat en [ClimateEngine.org](https://climateengine.org).

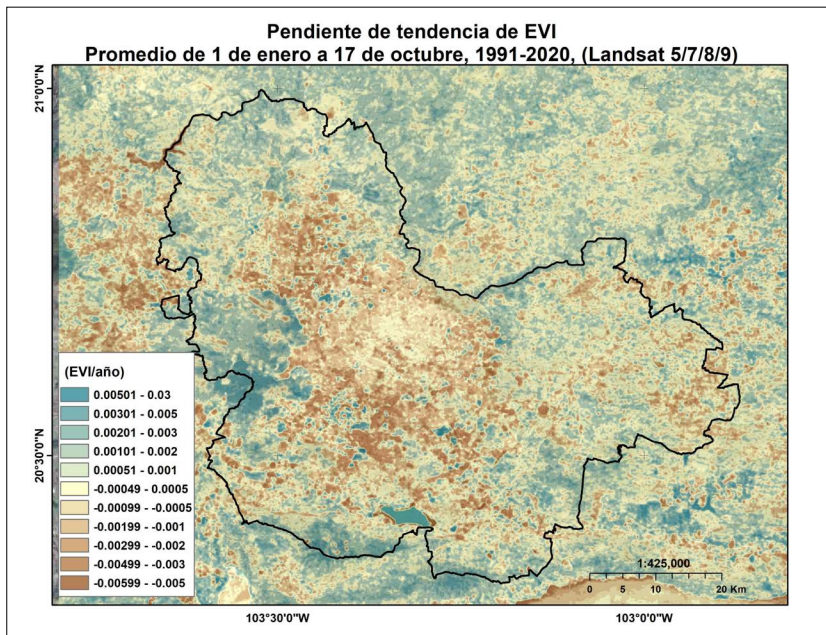


Figura 4 Diferencia en nivel de verdor-EVI en el AMG entre 1991 y 2020. Fuente: elaboración propia con datos Landsat de [climateengine.org](https://climateengine.org)

verdor del AMG a lo largo del siglo XXI. En temporada de secas (mes de abril) del periodo 2000-2005, la mayor frecuencia del índice EVI se encuentra en el rango de 0.1 a 0.2 (Figura 5a), indicando que la vegetación presenta alto estrés hídrico o simplemente corresponde a zonas sin vegetación. En este periodo, la frecuencia de valores EVI entre 0.1 y 0.2 es superior al 80% y entre 0 y 0.1 de apenas un 2%. Sin embargo, en el periodo 2017-2022, los EVI en el rango 0.1-0.2 el porcentaje se reduce a 60%, ya que aumenta significativamente para los valores de 0 a 0.1, a más de 20%, que corresponden a la presencia de zonas sin vegetación. El proceso resulta más claro cuando se analiza el periodo húmedo, de mayor salud de la vegetación. A finales de la temporada de lluvias (mes de septiembre) del periodo 2000-2005, la mayor frecuencia de EVI está entre 0.4-0.5, con alrededor del 45% y poco más de 20% en el rango de 0.5-0.6. Sin embargo, en el periodo húmedo de los años recientes 2017-2022, el porcentaje de puntos de EVI entre 0.4 y 0.5 se reduce a 37%, y el de valores EVI de 0.5 a 0.6 es solo del 12% (Figura 5b). Este análisis muestra que la infraestructura verde urbana se ha reducido significativamente y las zonas sin vegetación han aumentado en un periodo de alrededor de quince

años. La pérdida de vegetación en general resultado de cambio de uso de suelo a asfalto, concreto, acero y vidrio, asociado con el proceso de urbanización.

#### **b) El índice de confort en un ambiente y clima cambiantes**

El clima del AMG es de tipo monzónico con una temporada de lluvias entre junio y octubre y de secas entre noviembre y mayo. Las mayores temperaturas máximas y mínimas se alcanzan entre abril y junio, antes del inicio de la temporada de lluvias. Aunque la temperatura máxima promedio de mayo o junio es cercana a los 35 °C (Figura 6), los días de intenso calor pueden alcanzar más de 38 °C.

En los últimos sesenta años, la temperatura media de en el AMG ha aumentado en alrededor de 2 °C y los eventos por arriba de los 35 °C se han duplicado. Para ilustrar este cambio, se muestran los análisis de las temperaturas máximas en el municipio de Tonalá en tres periodos de diez años (1991-2000, 2001-2010 y 2011-2020). Para el primer periodo, 1991-2000, no se registran temperaturas mayores a 36° y las mayores frecuencias se concentran en los 26°, seguida de los 24° y en tercer lugar los 28°. Mientras que para el periodo 2001-2010 las mayores frecuencias

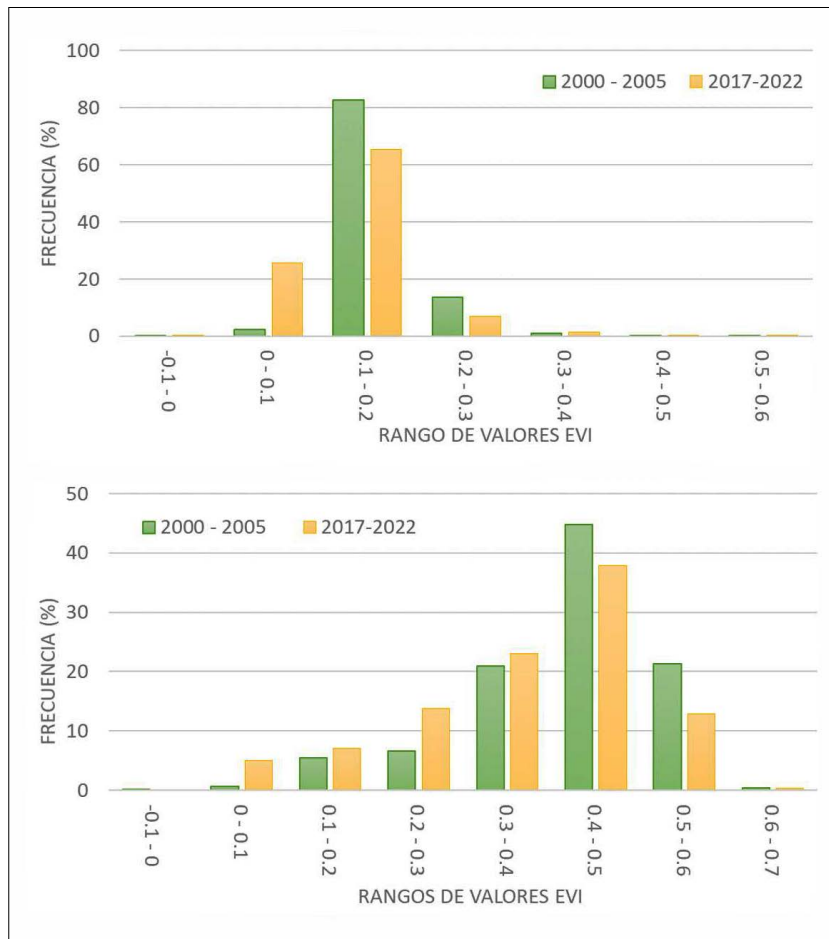


Figura 5. Contraste en la distribución de los valores EVI (entre 0 y 1) entre los periodos 2000-2005 y 2017-2020, a) para la temporada de secas (mes de abril) y b) para la temporada de lluvias (mes de septiembre).

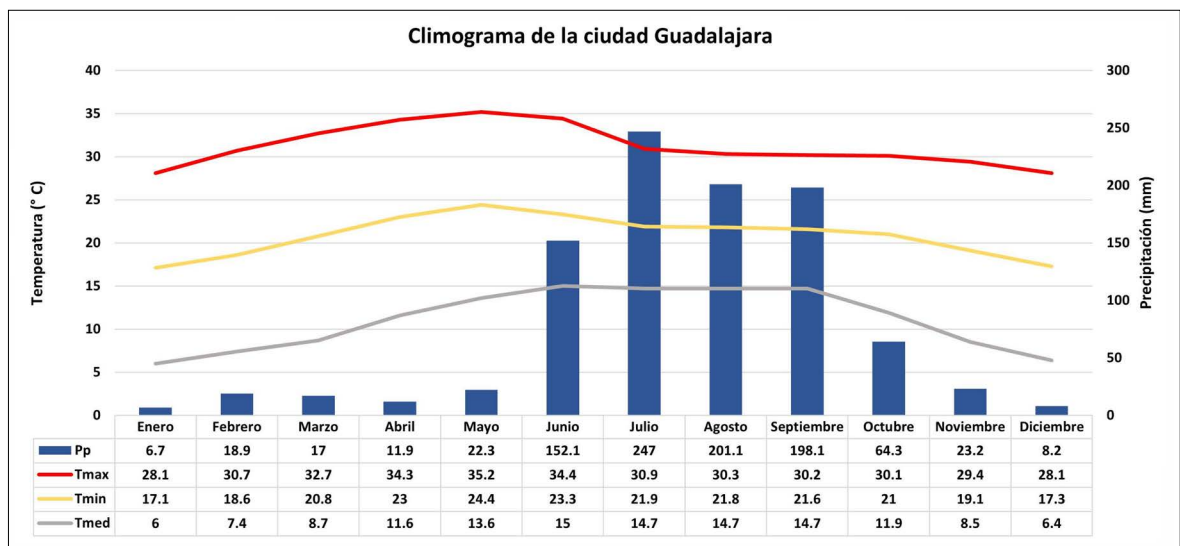


Figura 6. Precipitación y temperatura promedio en la ciudad de Guadalajara (1991-2020). Fuente: Instituto de Astronomía y Meteorología de la Universidad de Guadalajara (2020).



se registran en los 28°, los 30° y 32°. Además, aparecen temperaturas de 38° las cuales no se registraban treinta años antes (Figura 7). En la década de 2011-2020, los principales cambios están en el aumento en la frecuencia de valores altos de temperatura máxima.

En años recientes, el nivel de verdor estimado a través del EVI (Figura 8a) y la temperatura de

la superficie del suelo (Figura 8b) muestran un patrón espacial similar, reflejo de la relación entre uso de suelo (nivel de verdor) y temperatura de la superficie del suelo. En los meses de primavera, las zonas donde el EVI es bajo, el valor de la temperatura del suelo es mayor, como en la zona centro del municipio de Guadalajara o en regiones de suelos desnudos. En la zona de la Barranca de

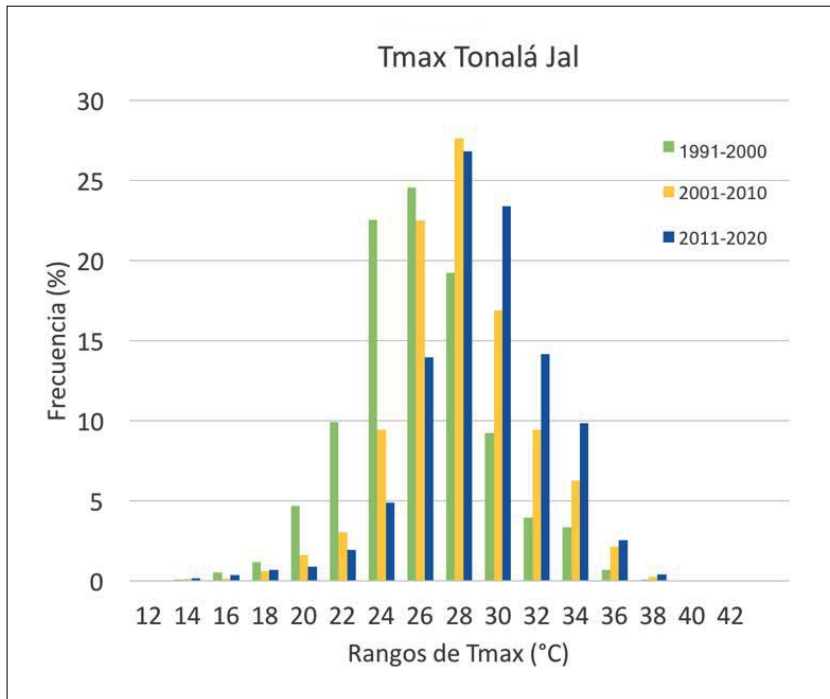


Figura 7. Temperaturas máximas presentadas en el municipio de Tonalá.

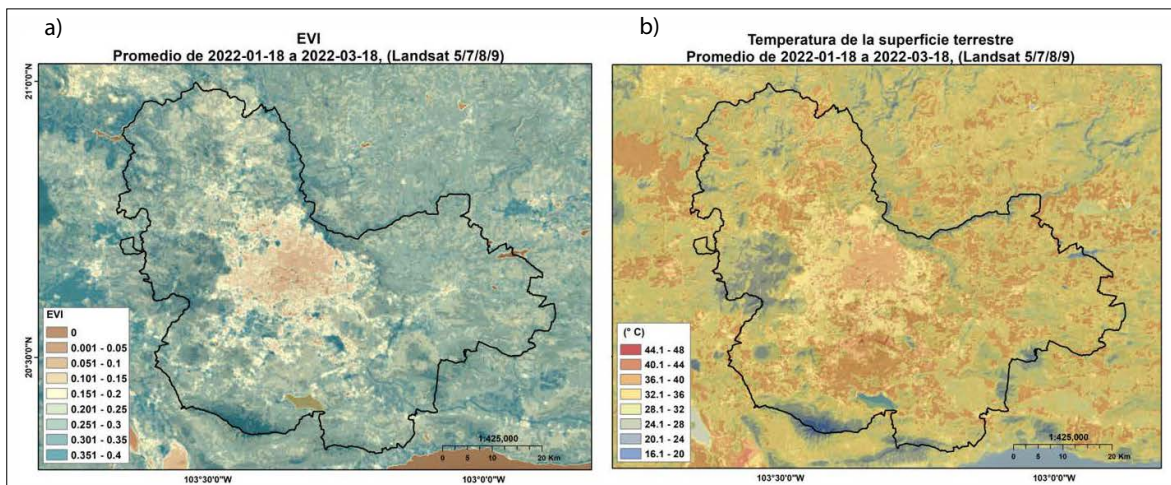


Figura 8 a) Promedio de EVI y b) temperatura de superficie del suelo sobre el AMG para el periodo 2020-2023. Fuente: elaboración propia con datos de la plataforma Climate Engine.

Huentitán y áreas con mayor infraestructura verde, el índice EVI aumenta y la temperatura del suelo es menor.

En el municipio de Tonalá, al oriente del AMG, se observa una de las mayores tendencias de deforestación y pérdida de verdor, al igual que un aumento de la temperatura de superficie del suelo. Es en esa región donde el nivel de confort se reduce de forma más significativa, y donde se concentran los mayores desarrollos inmobiliarios del AMG. El índice de calor o índice de confort es una medida que combina la temperatura de superficie del aire y la humedad relativa para evaluar la sensación térmica del cuerpo humano (NOAA, 2022). La humedad atmosférica impacta en la capacidad del cuerpo para regular su temperatura en condiciones de calor, por lo que es importante calcular la temperatura que siente el cuerpo bajo la influencia de alta temperatura y humedad para prevenir afectaciones a la salud. Cuando la humedad es elevada, la transpiración no se realiza de manera eficiente, aumentando la sensación térmica, ya que el cuerpo no logra enfriarse adecuadamente.

Para el presente estudio se calculó el índice de calor, también conocido como índice de confort térmico, a partir de datos diarios de temperatura máxima y humedad relativa en un rango en que

se diferencia de la temperatura máxima por el efecto de la humedad atmosférica, esto es, para temperaturas superiores a 27 °C y humedad relativa superior al 40%. Usando datos de las estaciones meteorológicas de la red de la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (SEMADET) y de CONAGUA se calculó el índice de calor diario entre dos períodos de tiempo, 1981-2000 y 2000-2018. Considerando que la señal más clara de cambios en el clima se detecta en los valores extremos (IPCC, 2007), se analizaron las probabilidades de  $IC > 30$  °C en el AMG y su zona urbanizada. Contraste el IC entre dos periodos permite establecer cómo la ICU genera peligro climático. Entre 1981 y el 2000, las mayores probabilidades de  $IC > 30$  °C se presentaban en la parte oriente con valores mayores de 30% (Figura 9a). El proceso de crecimiento urbano y deforestación, marcado al oriente y al sur del AMG incrementa las probabilidades de  $IC > 30$  °C en al menos un 10% para el periodo 2000-2018 (Figura 9b), alcanzándose así probabilidad de peligro de que el  $IC > 30$  °C sea hasta 40%. Lo anterior significa que, en décadas anteriores, con una zona urbanizada menor se podían tener más de 120 días con  $IC > 30$  °C. Sin embargo, en la actualidad ese número de días puede ser de alrededor de 140 días, lo que conlleva

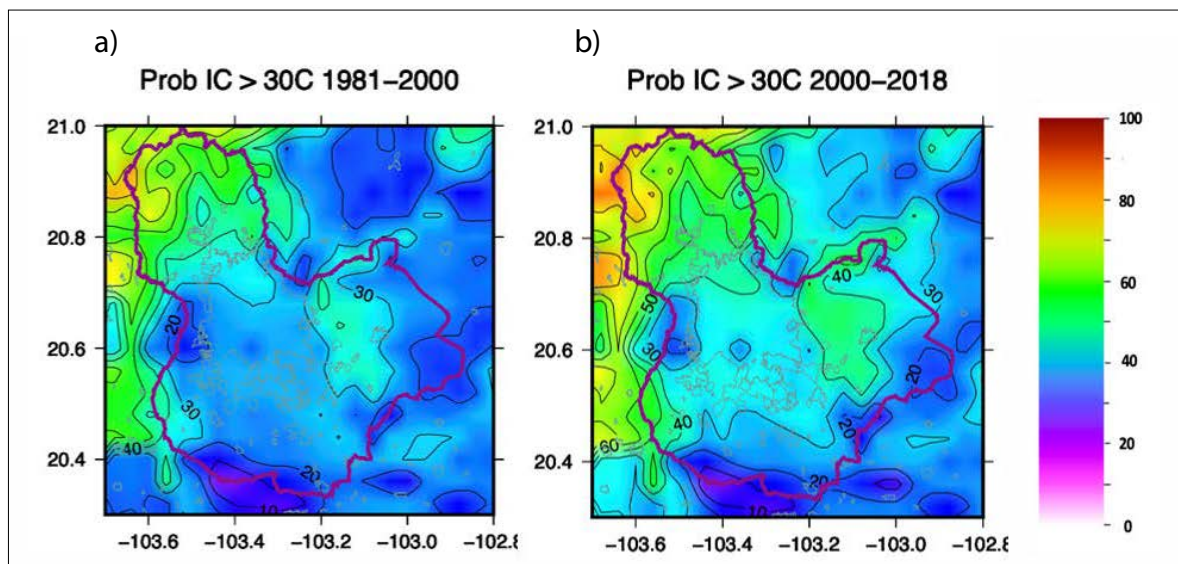


Figura 9. Probabilidad de  $IC > 30$  °C para dos periodos: a) 1981-2000 y b) 2000-2018. Fuente: elaboración propia, con datos proporcionados por el IGG-UNAM.



una temporada de calor intenso y peligroso más prolongada en una zona densamente poblada. Si el mismo análisis de peligro se realiza para probabilidades de IC > 33 °C, las probabilidades son menores del 20% y entre cada década el aumento es menor del 5%. Las probabilidades de IC > 35 °C permanece casi constante entre los dos periodos.

En las zonas donde se conservan aproximadamente las condiciones de verdor, los cambios en la probabilidad de aumento del IC son relativamente menores. Lo anterior muestra que, para rangos del IC que se consideran peligrosos, la ICU aumenta la probabilidad de caer en condiciones que la NOAA considera de peligro, por lo que se debe tener cuidado o cuidado extremo, principalmente entre los más vulnerables.

### a) El uso de suelo y la temperatura ambiente

Para mostrar el servicio de regulación de clima que ofrece el arbolado se realizaron mediciones de temperaturas atmosféricas de superficie en cinco puntos cercanos al Parque Colomos, de forma que se capturen los efectos que tienen diferencias en su uso de suelo (Figura 10), en un periodo de tres días consecutivos (13 al 15 de marzo del 2022), con una frecuencia de diez minutos entre las 15:00 a 17:00 horas, cuando se alcanzan las temperaturas máximas. Se midió la temperatura así como la humedad relativa.

El promedio de las temperaturas para los tres días de medición en la zona con arbolado, cerca del bosque (punto 1), son en general menores que los alrededores. En contraste, donde no hay

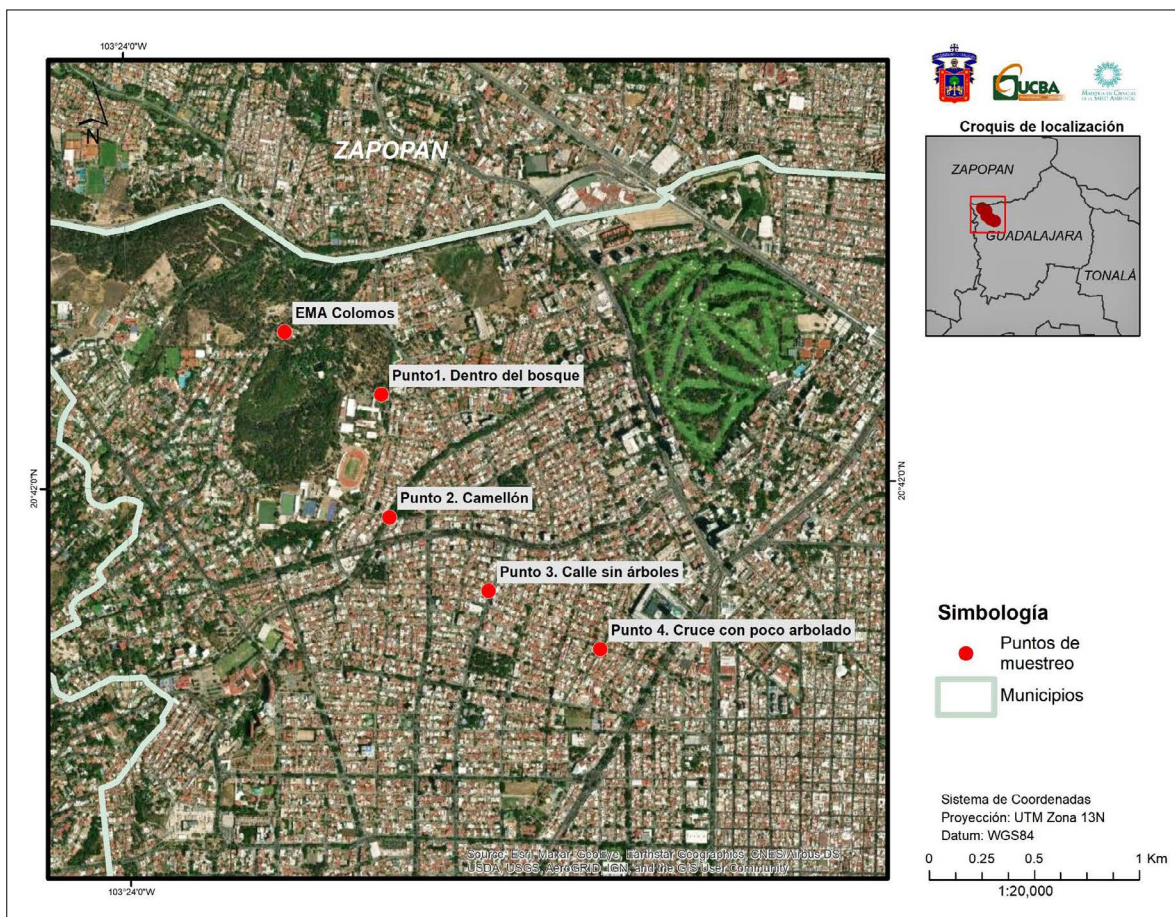


Figura 10. Ubicación de puntos de muestreo. Fuente: elaboración propia con datos de Google Earth.

vegetación (punto 3), la radiación solar calienta el suelo (asfalto) y la temperatura del aire es mayor, como sucede en la calle. En los puntos 2 y 4, la temperatura medida depende del uso de suelo dominante; en general, es menor en la zona de asfalto sin vegetación, pero mayor que en la zona con arbolado. Los datos de la estación meteorológica automática (EMA) dentro del Parque Colomos se usó como referencia, a pesar de que en su alrededor no hay árboles. La temperatura dentro del parque es comparable en donde existe cierta proporción de vegetación (puntos 2,4 y 5). El efecto de presencia de infraestructura verde ayuda a regular la temperatura máxima aun sin estar directamente a la sombra, por lo que las zonas urbanas que tienen árboles son en general más frescas que las de escasa vegetación (Figura 11). En promedio, los registros de temperatura del aire cerca de superficie indican que la diferencia entre un sitio con árboles y unos sin vegetación puede ser de hasta de 4 °C.

La humedad relativa en el área con árboles es por lo general mayor que en la zona cubierta por asfalto. Aunque mayor humedad tiende a incrementar ligeramente la sensación térmica dada por el IC, la menor temperatura máxima lleva a un IC en valores adecuados. La velocidad del viento en la muestra es en general muy débil (menos de 2 m/s)

en la zona de estudio, por lo que su efecto refrescante dado por la advección de calor (de “aire fresco”) fue pequeño. Durante la campaña de medición se observó que el viento proveniente del bosque Los Colomos tiene un efecto refrescante, dado por la advección de aire con menor temperatura hacia zonas de urbanización.

La temperatura del suelo, obtenida por imágenes de satélite Landsat para los meses de primavera (2022-01-18 y 2022-03-18), indica que en los puntos con mayor vegetación la temperatura del suelo es generalmente menor que en zonas donde domina la urbanización (Figura 12a). En la imagen de LST, se distinguen con las zonas con árboles y las de suelo desnudo o asfalto. La diferencia de temperatura de suelo en los puntos referidos en la campaña de marzo 2022 es mayor hasta 6 °C en zonas sin vegetación con respecto a zonas con arbolado (Figura 12b).

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La infraestructura verde de las áreas urbanas es un factor determinante como modulador del clima y por tanto en la condición de confort climático. Con los análisis de verdor y confort climático

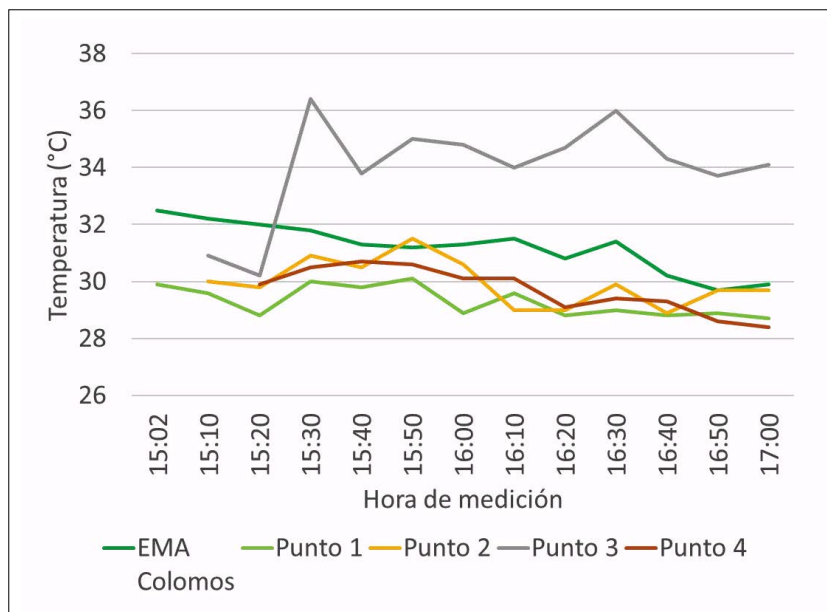


Figura 11. Promedio de registros de temperaturas (°C) registradas en los puntos de la Fig. 10 entre el 13 y 15 de marzo de 2022. Fuente: elaboración propia con datos de las estaciones EMA Colomos y registros en campo.



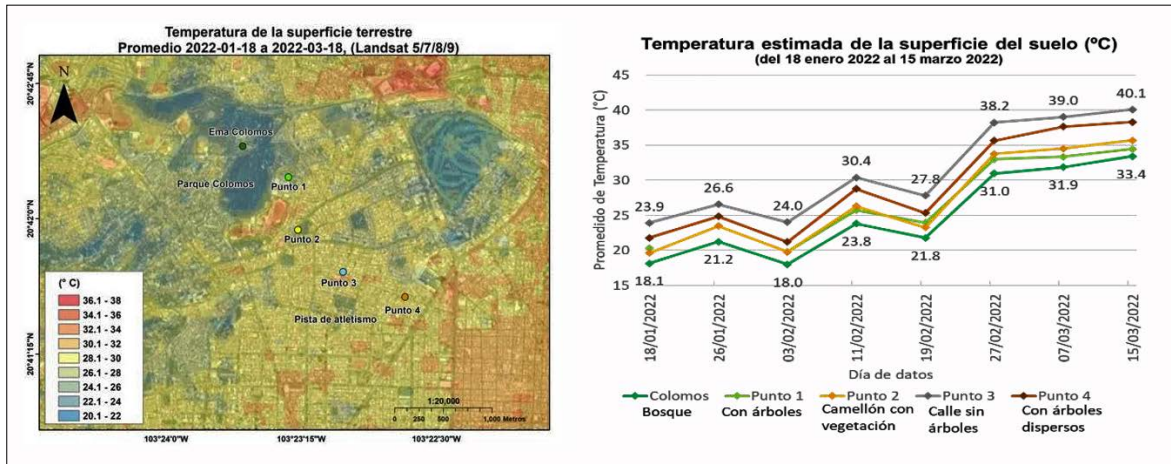


Figura 12. Estimación de la temperatura del suelo a través de imágenes Landsat, en los puntos de muestreo. Fuente: elaboración propia con imágenes de satélite Landsat.

del AMG, se resalta la importancia de conservar al menos un mínimo de infraestructura verde para mantener condiciones de confort tal como lo recomiendan organismos internacionales. En el AMG, el 40% de las colonias carecen de la infraestructura verde, necesaria para ofrecer condiciones de bienestar a sus habitantes.

Como en otras ciudades de México, el modelo urbano del AMG para las zonas densamente pobladas corresponde a uno donde se ocupa mayor espacio para casas habitación e infraestructura urbana que para parques o jardines, lo que lleva a menor vegetación que intensifica la ICU y genera un mayor riesgo climático para un mayor número de personas expuestas. En el AMG, el 85% de las zonas verdes corresponden a vegetación en la vía pública y aceras, lo que contribuye a un efecto de mitigación de la ICU, y a mejorar la calidad del aire. Sin embargo, dadas las condiciones de infraestructura urbana y sus tendencias, los servicios de regulación climática han ido disminuyendo.

Para mitigar la ICU, el incremento de áreas verdes con reforestación urbana se considera una opción efectiva, dado que su servicio de regulación permite reducir la temperatura del aire ambiente y regular las condiciones del microclima. Un estudio realizado en la ciudad de Shaoshan demostró que

10% de aumento en la tasa de cobertura vegetal reduce la temperatura superficial promedio en casi 1.5 °C (Agyemang *et al.*, 2019).

El AMG enfrenta desafíos en términos de recuperar infraestructura verde y una forma de reconocer el valor de los servicios ecosistémicos que ésta presta es en términos de los peligros que se presentan por ondas de calor. Bajo un enfoque de gestión de riesgos climáticos urbanos y con un abordaje que considere la suma de otras variables, será necesario concretar estrategias de acción que permitan mejorar las condiciones ambientales de sus habitantes para contrarrestar los peligros climáticos y mejorar el bienestar de la población.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo recibió apoyo de CONAHCYT a través de la beca proporcionada a Tonantzin Camacho Sandoval para estudios de maestría. Las facilidades proporcionadas por el CUCBA de la Universidad de Guadalajara han sido fundamentales para el desarrollo del presente trabajo. Este estudio forma parte del proyecto UNAM-PAPIIT IN111023 sobre riesgo climático en ambientes urbanos.

## REFERENCIAS

- Agyemang, W., Adanu, E., Akansiseh, S., y Kolawole Ojo, T. (2019). Towards Building Resilient Cities: Opportunities, Challenges and Innovation. En H. L. C. Ishmael Mensah, (Ed.), *Proceedings of the China-Africa Urban Development Forum*. University of Cape Coast.
- Alamilla Chan, D. y Davydova Belitskaya, V. (2020). Isla de calor y confort térmico en la Zona Metropolitana de Guadalajara. En V. Davydova Belitskaya (Ed.), *La gestión climática en Jalisco* (pp. 158-176). Universidad de Guadalajara.
- Amorim, J. H., Engardt, M., Johansson, C., Ribeiro, I., y Sannebro, M. (2021). Regulating and cultural ecosystem services of urban green infrastructure in the nordic countries: A systematic review. *International journal of environmental research and public health*, 18(3), 1219. <https://doi.org/10.3390/ijer-ph18031219>
- Andersson, E., Haase, D., Scheuer, S., y Wellmann, T. (2020). Neighbourhood character affects the spatial extent and magnitude of the functional footprint of urban green infrastructure. *Landscape Ecology*, 35(7), 1605–1618. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-01039-z>
- Arboit, M. E. (2017). Estimación del índice de vegetación en entornos urbanos forestados consolidados de baja densidad del área Metropolitana de Mendoza, Argentina. *Cuaderno urbano*, 23(23), 1-10. <http://dx.doi.org/10.30972/crn.23232688>
- Behzadi, F., Wasti, A., Rahat, S. H., Tracy, J. N., y Ray, P. A. (2020). Analysis of the climate change signal in Mexico City given disagreeing data sources and scattered projections. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 27, 100662. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100662>
- Búffalo, L. (2008). El uso del espacio público y la apropiación privada del espacio en la ciudad de Córdoba en Revista Proyección, 5. diciembre 2008, Universidad Nacional de Cuyo. [http://bdigital.uncu.edu.ar/objetos\\_digitales/3257/buffaloproyeccion5.pdf](http://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/3257/buffaloproyeccion5.pdf)
- Camacho-Sandoval, T. (2022). Caracterización y comportamiento de la infraestructura verde en Guadalajara, Jalisco y sus implicaciones como elemento de una ciudad saludable. Tesis de Maestría. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad de Guadalajara.
- Chen, X., de Vries, S., Assmuth, T., Dick, J., Hermans, T., Hertel, O., ... y Reis, S. (2019). Research challenges for cultural ecosystem services and public health in (peri-) urban environments. *Science of the Total Environment*, 651, 2118-2129. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.030>
- Colunga M. L., Cabromón-Sandoval, V. H., Suzán-Azpiri, H., Guevara-Escobar A. y Luna-Soria, H. (2015). The role of urban vegetation in temperature and heat island effects in Querétaro city, Mexico. *Atmósfera*, 28(3), 205-218.
- Comisión Europea (2013). *Building a green infrastructure for Europe*. [http://ec.europa.eu/environment/nature/ecosystems/docs/green\\_infrastructure\\_broc.pdf](http://ec.europa.eu/environment/nature/ecosystems/docs/green_infrastructure_broc.pdf)
- Cressman, G. P. (1959). An operational objective analysis system. *Monthly Weather Review*, 87(10), 367- 374. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1959\)087<0367:AOOAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1959)087<0367:AOOAS>2.0.CO;2)
- Cruz-Sandoval, M., Ortego, M. I., y Roca, E. (2020). Tree ecosystem services, for everyone? A compositional analysis approach to assess the distribution of urban trees as an indicator of environmental justice. *Sustainability*, 12(3), 1215. <https://doi.org/10.3390/su12031215>
- Curiel, A. (2014): Heat Wave Mortality June 10-13, 2005, in Jalisco, Mexico. 26th Annual International Society for Environmental Epidemiology Conference - From Local to Global: Advancing Science for Policy in Environmental Health. ISEE Conference Abstracts, 2014(1). <https://doi.org/10.1289/isee.2014.O-052>
- Dennis, M., Cook, P. A., James, P., Wheeler, C. P., y Lindley, S. J. (2020). Relationships between Health Outcomes in Older Populations and Urban Green Infrastructure Size, Quality and Proximity. *BMC Public Health* 20(1): 626 (2020). doi: [10.1186/s12889-020-08762-x](https://doi.org/10.1186/s12889-020-08762-x)
- Díaz, J. (2012). Servicios ecosistémicos culturales y de regulación en el parque Bosque Colomos para el bienestar social (Tesis de Maestría). Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Jalisco, México.
- Duncan, J. M. A., Boruff, B., Saunders, A., Sun, Q., Hurley, J., y Amati, M. (2019). Turning down the heat: An enhanced understanding of the relationship between urban vegetation and surface temperature at the city scale. *Science of the Total Environment*, 656, 118-128. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.223>
- Felappi, J. F., Sommer, J. H., Falkenberg, T., Terlau, W., y Kötter, T. (2020). Green infrastructure through the lens of “One Health”: A systematic review and integrative framework uncovering synergies and trade-offs between mental health and wildlife support in cities. *Science of the Total Environment*, 748, 141589. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141589>
- Frumkin H, Frank L, Jackson R. Urban Sprawl and Public Health: Designing, Planning, and Building for Healthy Communities. Washington DC: Island Press; 2004.

- García-Mora, T. J., y Mas, J. F. (2011). "Modland: los productos de superficie terrestre MODIS". En Mas, J. F.(Comp.). *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio* (pp. 25-70). Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental UNAM. <https://doi.org/10.22201/ciga.9786077908555e.2011>
- Genovese, D., Candiloro, S., D'Anna, A., Dettori, M., Restivo, V., Amodio, E., y Casuccio, A. (2023). Urban sprawl and health: a review of the scientific literature. *Environmental Research Letters*, 18(8), 083004. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ace986>
- Guillen-Cruz, G., Rodríguez-Sánchez, A. L., Fernández-Luqueño, F., y Flores-Rentería, D. (2021). Influence of vegetation type on the ecosystem services provided by urban green areas in an arid zone of northern Mexico. *Urban Forestry & Urban Greening*, 62, 127135. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127135>
- Gran, J. A. (2023). Denaturalizing climate change: Environmental injustice and social vulnerability in contexts of socio-spatial segregation in Mexico. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 103802. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103802>
- GSFC, (2022). MODIS Vegetation Index Products (NDVI and EVI). <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod13.php>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2020). Censo de población y vivienda. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- IIEG (Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco). (2020). Guadalajara Diagnóstico Municipal, marzo 2019. <https://iieg.gob.mx/ns/wp-content/uploads/2020/06/Guadalajara.pdf>
- Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco. (2020). Guadalajara Diagnóstico Municipal. <https://iieg.gob.mx/ns/wpcontent/uploads/2020/06/Guadalajara.pdf>
- IPCC (2001). Climate change: impacts, adaptation and vulnerability, WMO/UNEP, Cambridge.
- IPCC (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. IPCC, Ginebra, Suiza.
- Jauregui, E. (1987). Urban Heat Island Development in Medium and Large Urban Areas in Mexico. *Erdkunde*, 41(1), 48-51. <https://www.jstor.org/stable/25645088>
- Jauregui, E., Godinez, L. y Cruz, F. (1992): Aspects of heat-island development in Guadalajara, Mexico. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, 26(3), 391-396. [https://doi.org/10.1016/0957-1272\(92\)90014-J](https://doi.org/10.1016/0957-1272(92)90014-J)
- Jáuregui, E. (1997). Climates of Tropical and Sub-tropical Cities. En: M. Yoshino, M. Domrös, A. Douguédroit, J. Paszyński y L. C. Nkemdirim (Eds), *Climates and Societies-A Climatological Perspective*. The GeoJournal Library, 36. Springer, [https://doi.org/10.1007/978-94-017-1055-8\\_17](https://doi.org/10.1007/978-94-017-1055-8_17)
- Jáuregui, E. (2004). Impacto del uso del suelo en el clima de la Ciudad de México. *Investigaciones Geográficas*, (55), 46-60.
- Jáuregui, E. (2009) The heat spells of Mexico City. *Investigaciones Geográficas*, (70), 71-76.
- Jiménez, J. (2002). Gestión del Riesgo Climático Urbano: El caso del Área Metropolitana de Guadalajara. Tesis de Doctorado. Universidad de Guadalajara.
- Kim, G., y Miller, P. A. (2019). The impact of green infrastructure on human health and well-being: The example of the Huckleberry Trail and the Heritage Community Park and Natural Area in Blacksburg, Virginia. *Sustainable Cities and Society*, 48, 101562.
- López, M., Magaña, V. y Pérez, T. (2022) Riesgo de inundaciones urbanas repentinas en la Zona Metropolitana de Guadalajara, México. *Investigaciones Geográficas*, (108), e60547. <https://doi.org/10.14350/rig.60547>
- Lu, L., Fu, P., Dewan, A. y Li, Q. (2023). Contrasting determinants of land surface temperature in three megacities: Implications to cool tropical metropolitan regions. *Sustainable Cities and Society*, 92, 104505. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104505>
- Mengist, W., Soromessa, T., y Feyisa, G. L. (2020). A global view of regulatory ecosystem services: Existed knowledge, trends, and research gaps. *Ecological processes*, 9, 1-14. <https://doi.org/10.1186/s13717-020-00241-w>
- Mohammadyari, F., Zarandian, A., Mirsanjari, M. M., Suziedelyte Visockiene, J. y Tumeliene, E. (2023). Modelling Impact of Urban Expansion on Ecosystem Services: A Scenario-Based Approach in a Mixed Natural/Urbanised Landscape. *Land*, 12(2), 291. <https://doi.org/10.3390/land12020291>
- Nieuwenhuijsen, M. J. (2021). Green infrastructure and health. *Annual Review of Public Health*, 42, 317-328. <https://doi.org/10.1146/annurev-publ-health-090419-102511>
- NOAA (2022). The Heat Index Equation. National Weather Service. Heat Index Equation (noaa.gov).
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A. et al. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). (2020). Zonas Urbanas. Decenio de las Naciones Unidas sobre la Restauración de los Ecosistemas 2020-2030. <https://www.decadeonrestoration.org/es/types-ecosystem-restoration/zonas-urbanas>
- Observatorio de la Sostenibilidad en España (2008). *Sostenibilidad local: una aproximación urbana y rural*. Editorial Mundiprensa.

- Pineo, H., Zimmermann, N., Cosgrave, E., Aldridge, R. W., Acuto, M. y Rutter, H. (2018). Promoting a Healthy Cities Agenda through Indicators: Development of a Global Urban Environment and Health Index. *Cities & Health*, 2(1), 27-45. <https://doi.org/10.1080/23748834.2018.1429180>
- Russo, A., J Escobedo, F., y Zerbe, S. (2016). Quantifying the local-scale ecosystem services provided by urban treed streetscapes in Bolzano, Italy. *AIMS Environmental Science*, 3(1), 58-76. <https://doi.org/10.3934/environsci.2016.1.58>
- Salmond, J. A., Tadaki, M., Vardoulakis, S., Arbuthnott, K., Coutts, A., Demuzere, M., ... Y Wheeler, B. W. (2016). Health and climate related ecosystem services provided by street trees in the urban environment. *Environmental Health*, 15(1), 95-111. <https://doi.org/10.1186/s12940-016-0103-6>
- 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), 6763. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26768-w>
- Tella, G. y Potocko, A., (2009). Los espacios verdes públicos. Una delicada articulación entre demanda y posibilidades efectivas, *Revista Mercado y Empresas para Servicios Públicos*, n. 55: 40-55.
- UNDP (United Nations Development Programme). (2020). GOAL 11: Sustainable Cities and Communities. <https://www.undp.org/content/undp/en/home/sustainabledevelopment-goals/goal-11-sustainable-cities-and-communities.html>
- Velasco, E., & Segovia, E. (2018). ¿Por qué las ciudades necesitan árboles y espacios verdes? *Universitarios Potosinos*, 223, 16-21.
- Venn, S. J. y Niemelä, J. K. (2004). Ecology in a multidisciplinary study of urban green space: the URGE project. *Boreal Environment Research*, 9(6), 479.
- Wang, Y., Chang, Q., Fan, P., y Shi, X. (2022). From urban greenspace to health behaviors: An ecosystem services-mediated perspective. *Environmental Research*, 213, 113664. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113664>
- Zhang, B., Xie, G., Zhang, C., y Zhang, J. (2012). The economic benefits of rainwater-runoff reduction by urban green spaces: A case study in Beijing, China. *Journal of environmental management*, 100, 65-71. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.01.015>
- Ziter, C. D., Pedersen, E. J., Kucharik, C. J. y Turner, M. G. (2019). Scale-dependent interactions between tree canopy cover and impervious surfaces reduce daytime urban heat during summer. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(15), 7575-7580. <https://doi.org/10.1073/pnas.1817561116>