

Clima cambiante en la Zona Metropolitana de Xalapa, Veracruz: factores naturales y antrópicos

Changing climate in the Metropolitan Zone of Xalapa, Veracruz: natural and anthropic factors

Nuria Vargas* y Mary Frances Rodríguez Van Gort**

Recibido: 29/01/2024. Aceptado: 25/3/2024. Publicado: 06/06/2024.

Resumen. La urbanización induce cambios en el clima como la llamada Isla de Calor Urbana (ICU). La Zona Metropolitana de Xalapa (ZMX), Veracruz, ha experimentado un crecimiento urbano acelerado en las últimas tres décadas, lo que produce una tendencia al calentamiento. Sin embargo, la fuerte influencia climática de la vertiente del Golfo de México, también actúa como modulador del clima en la región, por formas de variabilidad en períodos decadales, como la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO por sus siglas en inglés). En el presente estudio se establece una relación entre la temperatura máxima de superficie de la ZMX, el índice AMO, y la urbanización, como forzantes de origen natural y antrópico, respectivamente. Se usaron promedios de datos de estaciones climáticas, datos de satélite y de reanálisis. A través de gráficas en series de tiempo y un análisis espectral, fue posible determinar la relación existente entre las variables de interés. Los resultados indican que las zonas de la ciudad donde ocurre un cambio de uso del suelo drástico, como por ejemplo al pasar de bosque a suelo urbano, se ha experimentado un calentamiento del orden de 2°C, en las últimas dos décadas, a pesar de presentarse una fase positiva del índice AMO, en la que se esperaba que las temperaturas no incrementaran de esa manera. Por otro lado, en la parte de la ZMX donde el modelo de desarrollo urbano conserva gran parte de arbolado y vegetación, las temperaturas cambian mayormente en relación con el forzante natural, es decir, por el índice AMO.

Así, la ciudad de Xalapa y su área metropolitana son un ejemplo de la influencia de factores de variabilidad natural del clima (AMO), así como de factores antrópicos (urbanización) que generan un cambio climático local en escala temporal de décadas, por lo que el análisis más completo de la variación de muy largo periodo en el clima debe tomar en cuenta los forzantes naturales en estas escalas temporales.

Palabras clave: variabilidad climática, Oscilación Multidecadal del Atlántico, cambios del uso del suelo, urbanización, temperaturas máximas.

Abstract. Urbanization induces climate changes such as the so-called Urban Heat Island (UHI). The Metropolitan Zone of Xalapa (ZMX), Veracruz, has experienced accelerated urban growth in the last three decades, which produces a warming trend. However, the strong climatic influence of the Gulf of Mexico slope also acts as a climate modulator in the region, through forms of variability in decadal periods, such as the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO). The present study establishes a relationship between the maximum surface temperature of the ZMX, the AMO index, and urbanization, as natural and anthropogenic forcing, respectively. Averages of data from weather stations, satellite and reanalysis data were used. Through time series plots and spectral analysis, it was possible to determine the

* Facultad de Filosofía y Letras. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Circuito Interior s/n, C.U., Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6369-691X>. Email: nunube@gmail.com

** Facultad de Filosofía y Letras. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Circuito Interior s/n, C.U., Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3996-2282>. francesrv@gmail.com

relationship between the variables of interest. The results indicate that the areas of the city where there has been a drastic change in land use, for example, from forest to urban land, have experienced a warming of about 2°C in the last two decades, despite a positive phase of the AMO index, in which it would be expected that temperatures would not increase in this way. On the other hand, in the part of the ZMX where the urban development model preserves a large part of trees and vegetation, temperatures change mostly in relation to the natural forcing, i.e., the AMO index.

INTRODUCCIÓN

Desde hace varios años, la preocupación por los impactos de los cambios en el clima sobre la sociedad ha aumentado (IPCC, 2007). Los proyectos de adaptación generalmente se basan en el clima esperado o proyectado que comúnmente corresponde a temperaturas mayores que las actuales (IPCC, 2000). Sin embargo, el clima para las próximas décadas dependerá de diversos factores que frecuentemente no son considerados en los escenarios de cambio climático, que influyen significativamente en el clima y que dan como resultado anomalías climáticas, principalmente a escala regional o local, como puede ser en las ciudades. Así, al cambio climático global se debe añadir el efecto que tendrán procesos de modulación del clima por factores naturales de muy baja frecuencia o por efectos locales como el de la isla de calor urbana (ICU).

El problema del cambio climático en ambientes urbanos ha sido estudiado por más de un siglo (Howard, 1818; Oke *et al.*, 2017). La formación de las ICU en ciudades medias y grandes se determina al analizar el contraste entre la temperatura de la zona urbanizada con respecto a su periferia rural (Oke, 1967; Manoli *et al.*, 2019). En México, desde la década de 1970, el número de ciudades medias se ha incrementado y a la fecha, existen más de 70 zonas metropolitanas en el país con una población cercana o mayor a un millón de habitantes. Esta tendencia a una población mayormente urbana ha dado como resultado la formación de ICU que en algunos casos pueden llegar a representar un riesgo a la salud de los habitantes. Las ICU en diversas partes de México fueron documentadas inicialmente por Jáuregui (Jáuregui, 1993, 2009), estudios que

Thus, the city of Xalapa and its metropolitan area are an example of the influence of natural climate variability factors (AMO), as well as anthropic factors (urbanization) that generate local climate change on a time scale of decades, so that the most complete analysis of very long period variation in climate must take into account the natural forcing on these time scales.

Keywords: climate variability, Atlantic Multidecadal Oscillation, land-use change, urbanization, maximum temperatures.

aún son la base para análisis actuales del problema. A la fecha se han sumado otros autores que abordan el mismo tema junto con los impactos asociados a la ICU (Tejeda y Acevedo, 1990; Vargas y Magaña, 2020; García-Cueto *et al.*, 2007).

Las ICU en México han sido descritas a partir de la tendencia de la temperatura máxima de décadas recientes (Jáuregui, 1993, 2009). En algunos casos, el efecto de la ICU en la precipitación sobre las ciudades también ha sido descrito como parte de los cambios del clima que induce el cambio en el uso del suelo (Jáuregui y Romales, 1996). Sin embargo, existen variaciones del clima, por ejemplo, en temperatura o precipitación, en plazos de décadas relacionados a forzantes climáticos naturales de muy baja frecuencia (por ejemplo, Azhar *et al.* 2020). En particular, la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO, por sus siglas en inglés) es un forzante natural de gran importancia en el clima de los trópicos (Azuz-Adeath, *et al.*, 2019; Jae-Heung y Li, 2018), cuyas señales (modulaciones en el clima) explican condiciones como las de sequías meteorológicas en México (Méndez y Magaña, 2010). Así, las variaciones de muy baja frecuencia en el clima regional pueden deberse a forzantes de origen antrópico o natural. En algunos casos, la magnitud de la ICU puede superar el efecto forzante de la AMO y con ello se puede proyectar cómo cambiará el clima en las décadas próximas, considerando principalmente proyecciones de crecimiento urbano. De esta manera, a los efectos ICU y AMO se les debe añadir el efecto que tendrá el calentamiento global para hacer prospectiva del clima en escalas de décadas.

La ZMX ubicada en el centro de Veracruz (Figura 1) ha experimentado un rápido crecimiento

demográfico y territorial desde inicios del 2000, al pasar de una población de 591 053 habitantes a 789 157 en 2020 (Tabla 1). Su tamaño en el año 2000 era de 44 400 hectáreas, y en 2020 se extendió a 109 000 hectáreas, con una densidad de población que pasó de 13 hab/ha a 7 hab/ha. Esto implica mayor ocupación de superficie con una densidad poblacional baja que requiere mayores recursos de suelo, energéticos y servicios. Un modelo de crecimiento urbano de este tipo genera más contaminación y es insostenible, por lo que incluso se establecen rangos óptimos de densidad poblacional que pueden ir desde los 120 hab/ha a los 350 hab/ha (Higueras, 2009). Así, la población de la ZMX se aproxima al umbral de un millón de habitantes, para el cual, Tejeda, Luyando y Jáuregui (2011) proponen una fórmula para estimar los potenciales incrementos de temperatura por efecto de la ICU. De acuerdo con Tejeda (Tejeda *et al.*, 2011), el incremento de la temperatura por el efecto de la ICU, para una población de alrededor de 600 mil habitantes podría ser de hasta 1 °C. Esta aproximación supone que el desarrollo urbano sigue el patrón tradicional de cambio de la vegetación o bosque por elementos urbanos. De continuar el incremento de población en la ZMX a cerca del millón de habitantes, la estimación indica que el contraste térmico urbano-rural de la ICU podría ser de aproximadamente 2 °C. Pero tales incrementos de temperatura dependerán del modelo de urbanización a seguir. Existen propuestas que muestran que la conservación de la vegetación o la existencia de cuerpos de agua metropolitanos pueden mitigar la intensidad de la ICU (Schwaab *et. al.*, 2021; Gunawardena *et al.*, 2017). Por lo anterior, documentar los cambios de clima que tienen lugar en ciudades requiere con-

siderar el modelo de crecimiento urbano seguido o proyectado.

Por otro lado, proyectar el clima de algún lugar, por ejemplo, incluyendo periodos decadales, requiere incluir procesos naturales de gran escala y muy largo periodo que se reflejan en el clima local, como la AMO, cuyo efecto sobre Xalapa y sus alrededores debe ser determinado e incluido en cualquier proyección realizada. Aún más, los escenarios futuros de calentamiento global para las próximas décadas determinarán el clima sobre Xalapa. Por ello, las acciones de mitigación y adaptación deben contemplar las diversas formas en que se puede comportar el clima.

Por lo anterior, este trabajo presenta el análisis de variaciones de muy baja frecuencia (décadas) del clima de una zona urbana como la ZMX, en el que se observa el papel que juega el modelo de crecimiento urbano, con o sin conservación de vegetación, así como del efecto de la modulación que el clima local por fenómenos de muy baja frecuencia como la AMO, e incluso el efecto que tiene la tendencia de calentamiento global. El trabajo se divide de la siguiente manera: en el primer apartado se presenta una breve introducción al problema y se expone el objetivo de estudio. En el segundo apartado se describen las fuentes de datos utilizadas para el análisis y se indica la metodología seguida. Los resultados y su interpretación se presentan en el último apartado y en la cuarta sección se dan conclusiones del estudio.

DATOS Y METODOLOGÍA

Al igual que en la mayoría de las ciudades medias de México, Xalapa ha incorporado municipios ale-

Tabla 1. Habitantes, superficie de ocupación y densidad poblacional de la Zona Metropolitana de Xalapa, Veracruz.

ZMX	1990	2000	2010	2020
Habitantes	461 108	591 053	711 139	789 157
Superficie (km ²)		444 km ²	867 km ²	1090 km ²
Densidad poblacional		13.3 hab/ha	8.2 hab/ha	7.2 hab/ha

Fuente: INEGI-CONAPO (2004, 2020), SEDATU (2015).

daños a su zona urbana para constituirse como una Zona Metropolitana (Figura 1). Esta rápida urbanización ha generado una ICU que puede identificarse a través de imágenes de satélite de temperatura del suelo (LST, Land Surface Temperature) las cuales se encuentran disponibles en Climate Engine, NASA-MODIS, LST (<https://www.climateengine.org>). El crecimiento urbano de la zona de estudio fue documentado a través de imágenes de satélite y con información de áreas geostatísticas básicas urbanas (INEGI, 2000, 2010 y 2020) para conocer la expansión urbana que ha tenido lugar en Xalapa y su área metropolitana. Además, se cuenta con imágenes de satélite Sentinel para delimitar las

ciudades y poblaciones del mundo para los años 1975, 1990, 2000 y 2020 (Pesaresi y Politis, 2023).

Los datos diarios de temperatura del aire alrededor de la ZMX se obtuvieron para un periodo promedio de 1960 a 2020, de la red de estaciones climatológicas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2023) y en los últimos años, de la estación de la Universidad Veracruzana (UV) (Figura 1). Para el diagnóstico de las tendencias del clima en la región de Xalapa y zonas periféricas se utilizaron datos diarios de doce estaciones climatológicas de la red de observación de la CONAGUA. Las series de tiempo correspondientes cubren diversos periodos y a pesar de los vacíos de información existentes,

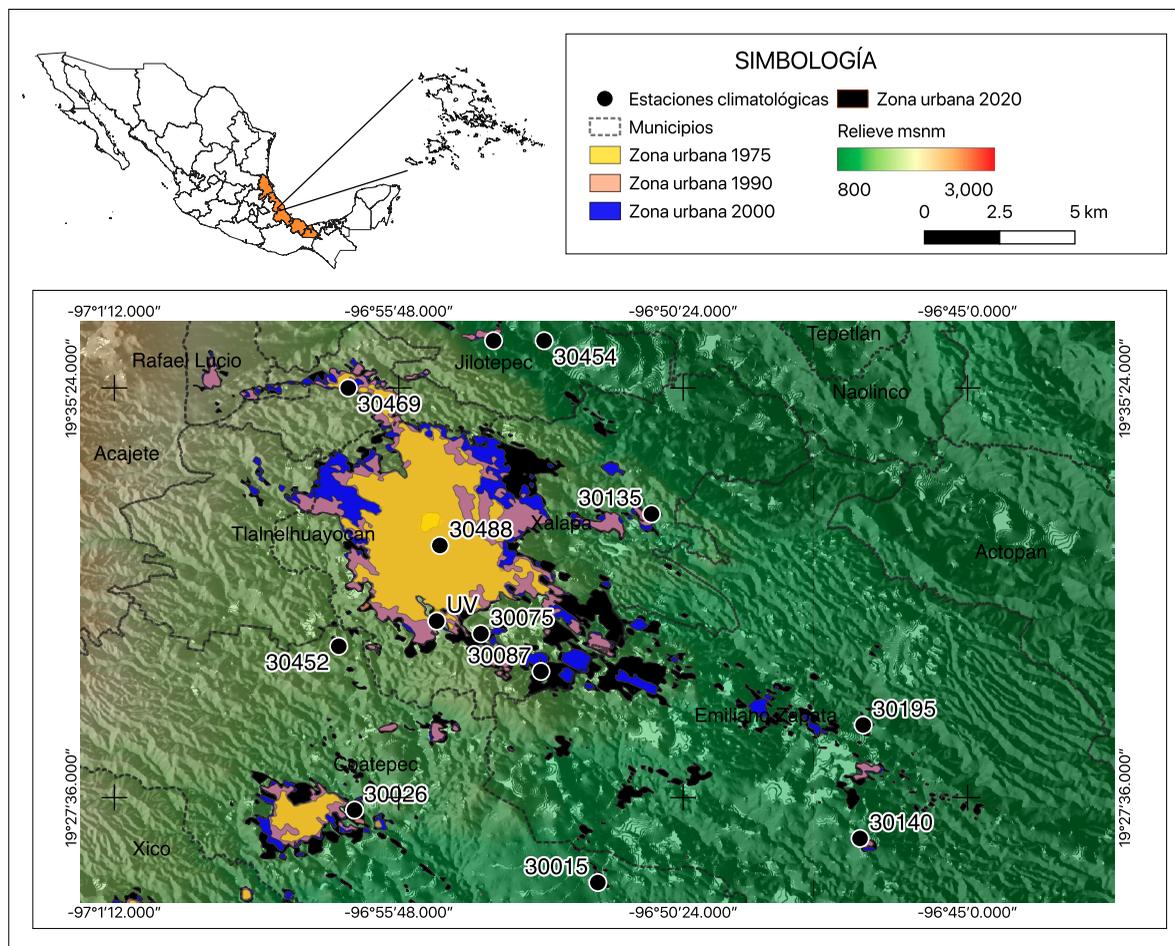


Figura 1. Área urbanizada de la ZMX en diferentes periodos: 1975, 1990, 2000 y 2020, orografía y ubicación de las estaciones climatológicas usadas en el estudio. Fuente: elaboración propia con datos de INEGI, GHS (2022), CONAGUA y Universidad Veracruzana.

permiten en conjunto analizar las variaciones y tendencias del clima local (Tabla 2).

Las variaciones climáticas de muy baja frecuencia en la ZMX se pueden relacionar a las condiciones de la AMO, tal como se ha sugerido para otras regiones del mundo (Azhar *et. al.*, 2020). Los datos del índice AMO se obtuvieron de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, por sus siglas en inglés), (2023) y se compararon con los datos promedio de estaciones en la ZMX. Además, se utilizó un análisis espectral para corroborar las relaciones interdecadales entre el índice AMO y las temperaturas máximas de la ZMX. Adicionalmente, se utilizaron los datos de temperatura del planeta generados por el National Center for Environmental Information (NCEI, por sus siglas en inglés) y la NOAA, que muestran el proceso de calentamiento global. Para el presente análisis solo se consideraron las temperaturas en el Golfo de México que reflejan el proceso de calentamiento en la región, como señal del proceso de calentamiento climático global. Mediante análisis de series de tiempo se estima en qué medida cada forzante climático contribuye a las variaciones y tendencias del clima observadas en la ZMX, entre 1960 y 2018, es decir, se compara la contribución de: i) la urbanización, ii) el índice AMO y iii) el proceso de calentamiento global. Tam-

bién se comparan los patrones de calentamiento con el nivel de verdor, relacionado con el índice de vegetación mejorado (EVI, por sus siglas en inglés), que muestra cómo la expansión urbana reduce la vegetación existente. Los datos de EVI, disponibles para el periodo 2000-2022 se encuentran disponibles en <https://www.climateengine.org>

RESULTADOS

Estimaciones de los cambios interdecadales de temperatura

Hasta antes de 1990, la ZMX se configuraba en un núcleo compacto en el municipio del mismo nombre. Sin embargo, desde 1990 la extensión urbana abarca municipios aledaños en una ocupación fragmentada del territorio con gran impacto en la pérdida de vegetación (Figura 1). Así, la ZMX se extiende alrededor de seis municipios situados en la pendiente de la Sierra Madre Oriental con un marcado gradiente orográfico, lo que determina que, hacia el este, a mayores alturas, se tengan temperaturas bajas, mientras que hacia el oeste las temperaturas aumenten significativamente.

El proceso de expansión urbana ha conducido a la eliminación de bosques y zonas agrícolas para

Tabla 2. Estaciones climatológicas utilizadas para el estudio, periodos de datos, porcentajes de cobertura de datos y ubicación de la estación.

ID Estación	Periodo de datos	Porcentaje de datos	Coordenadas
30075	1951-2018	80%	-96.9040, 19.5120N
30087	1953-2012	73%	-96.8850, 19.5000N
30015	1964-1989	44%	-96.8670, 19.4330N
30452	1984-2018	100%	-96.9490, 19.5080N
30026	1961-2018	76%	-96.9440, 19.4560N
30195	1964-2009	100%	-96.7830, 19.4830N
30140	1969-2018	100%	-96.7840, 19.4470N
30267	1974-2018	95%	-96.9000, 19.6050N
30469	2004-2018	95%	-96.9460, 19.5900N
30454	1995-2018	96%	-96.8840, 19.6050N
30135	2005-2018	96%	-96.8500, 19.5500
30488	2011-2015	80%	-96.9170, 19.5400
UV	2011-2022	100%	-96.9182, 19.5163

dar paso a infraestructura con edificios, casas, calles y otros elementos arquitectónicos en donde domina la presencia de concreto, asfalto y vidrio, materiales que alteran el balance radiativo local y resultan en la formación de una isla de calor urbana (Oke, 2017). Cabe mencionar que este modelo de crecimiento es el típico que actualmente siguen las ciudades en nuestro país.

De acuerdo con datos de reanálisis meteorológicos ERA5 (disponibles desde 1979), se puede observar que la temperatura máxima promedio anual y la temperatura mínima anual, tienden a incrementarse hacia finales de 1990 (Figura 2), para después pasar por un periodo estable y después de 2015 volver a incrementarse de manera significativa. Pero estas tendencias reflejan lo que sucede en un periodo de cuarenta años solamente (1979-2020), y promediando áreas relativamente extensas en comparación con el tamaño de la zona urbana. Por tanto, es necesario recurrir también a datos de estaciones, ubicadas en diversos puntos de la ZMX, para de esta manera analizar las tasas de cambio en la temperatura o a través del uso de gráficos de la temperatura del suelo dada por satélites, como un *proxy* de la temperatura del aire.

Aunque la frecuencia de las estimaciones de la temperatura del suelo es irregular, pero de alrededor de una semana, es posible identificar en una versión suavizada, que entre 1990 y el año 2000, la temperatura se incrementa, pero hacia finales de 2020 disminuye. Tal estimación de las variaciones de muy baja frecuencia en las temperaturas míni-

ma y máxima pareciera sugerir que en la última década (2010-2020) la temperatura presenta una tendencia a la baja, ligeramente. Si bien el análisis contempla la parte urbanizada y no urbanizada en la ZMX y sus alrededores, se encuentra que hay factores que no solo inducen calentamiento, sino también factores que inducen a un ligero enfriamiento reciente.

Otra forma de analizar las variaciones interdecadales de la temperatura en la ZMX y sus alrededores es a través de las condiciones de temperatura superficial del suelo, en promedio por década (Figura 3). Por ejemplo, con datos a partir de 1993 y hasta 2022, es posible identificar en periodos de diez años, los cambios que pueden ocurrir. Así, entre 1993 y 2002, se observa un periodo en el cual, la temperatura más frecuente era de 24 °C y en menor medida 30 °C, mientras que entre 2003-2012 la frecuencia mayor cae entre los 30 °C. Finalmente, para el periodo 2013-2022, se observa que, las temperaturas más frecuentes se ubican entre los 28 °C y 30 °C que, en comparación con la década anterior, son menores, lo que indica un ligero decremento de la temperatura.

En este mismo aspecto, al observar la distribución de la temperatura superficial en el espacio, se puede comparar el periodo 2000-2010 (Figura 4a) con el periodo 2010-2020 (Figura 4b) se observa un ligero descenso en la temperatura superficial. En la ZMX y sus alrededores, las áreas con mayor temperatura del suelo corresponden a la parte urbanizada y las zonas agrícolas o potreros del este,

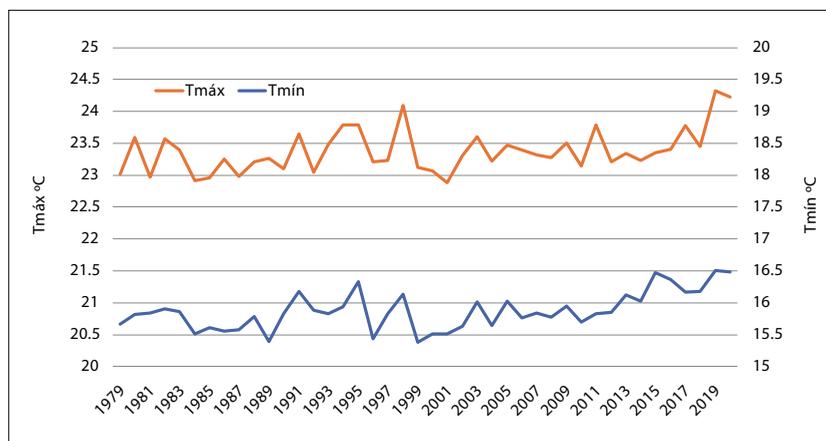


Figura 2. Temperaturas máximas y mínimas, promedio anual en el dominio correspondiente a áreas urbanizadas de la Zona Metropolitana de Xalapa entre 1979 y 2020 con datos de reanálisis. Fuente: ERA 5Ag.

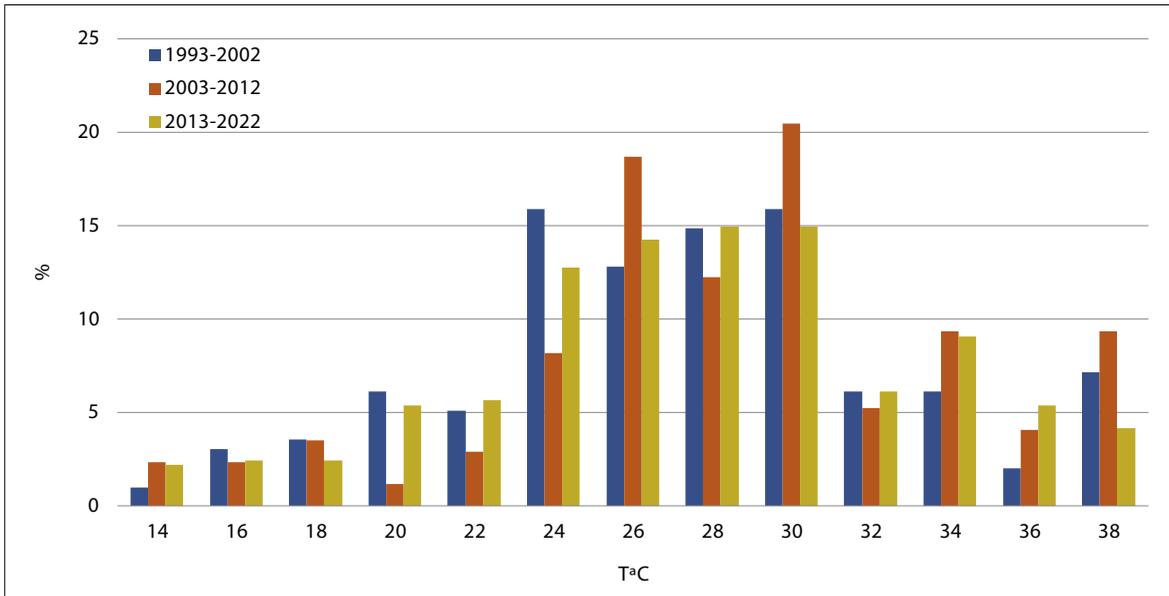


Figura 3. Diagrama de frecuencia de temperatura (°C) del suelo por periodos, a) 1993-2002 (columna azul), b) 2003-2012 (columna naranja) y c) 2013-2022 (columna amarilla) para la Zona Metropolitana de Xalapa. Fuente de datos: ClimateEngine.org (2023).

que están en la parte más baja (<1000 msnm) y con frecuencia se trata de suelos desnudos, susceptibles al calentamiento intenso. Por el contrario, al oeste del dominio se ubican las zonas altas de la montaña, con bosques y vegetación que mantienen baja la temperatura del suelo. En la zona urbanizada, las temperaturas menos cálidas corresponden a parques, lagos, áreas protegidas estatales y zonas periurbanas. El patrón de la temperatura del suelo en la ZMX y sus alrededores permite identificar con claridad la ICU dentro de la zona urbana. Para el segundo periodo de análisis, se observa un enfriamiento generalizado. Esto sugiere que hay un proceso modulador del clima de muy baja frecuencia que es recurrente.

Los datos de estaciones meteorológicas en el dominio de interés permiten analizar cómo ha cambiado la temperatura máxima en la ZMX desde 1950. Usando valores medios mensuales de temperatura máxima de las estaciones urbanas se aprecia que se presentan oscilaciones de muy baja frecuencia (interdecadales) en este dominio. A pesar de datos faltantes en ciertos periodos, la información es suficiente para establecer el comportamiento del

clima con periodos decadales. Entre 1950 y 1970, los valores de temperatura máxima promedio anual oscilaban entre los 19 °C y los 22 °C. En la década de los 1970 y hasta mediados de los 1990 las temperaturas están en un rango entre 21 y 24 °C. A partir del año 2000, las temperaturas máximas en algunas estaciones disminuyen a rangos de entre 10 °C y 21 °C, mientras que otras estaciones se mantienen entre 20 °C y 23 °C (Figura 4). Esta oscilación en la temperatura máxima sugiere un efecto de modulación climática dado por un forzante con características temporales similares. La relación entre el índice AMO y las temperaturas máximas en diversas estaciones de la ZMX se presenta de manera inversa. Cuando el índice AMO es positivo (negativo) las temperaturas máximas tienden a descender (aumentar), posiblemente por las condiciones de cielos nublados que reducen la radiación directa. Bajo condiciones opuestas, con el índice AMO negativo, las condiciones atmosféricas tienden a ser más secas lo que conlleva menor presencia de nubes y, por consiguiente, la radiación llega directa a la superficie calentando más. La relación entre estas variables, sin embargo, se vuelve menos marcada

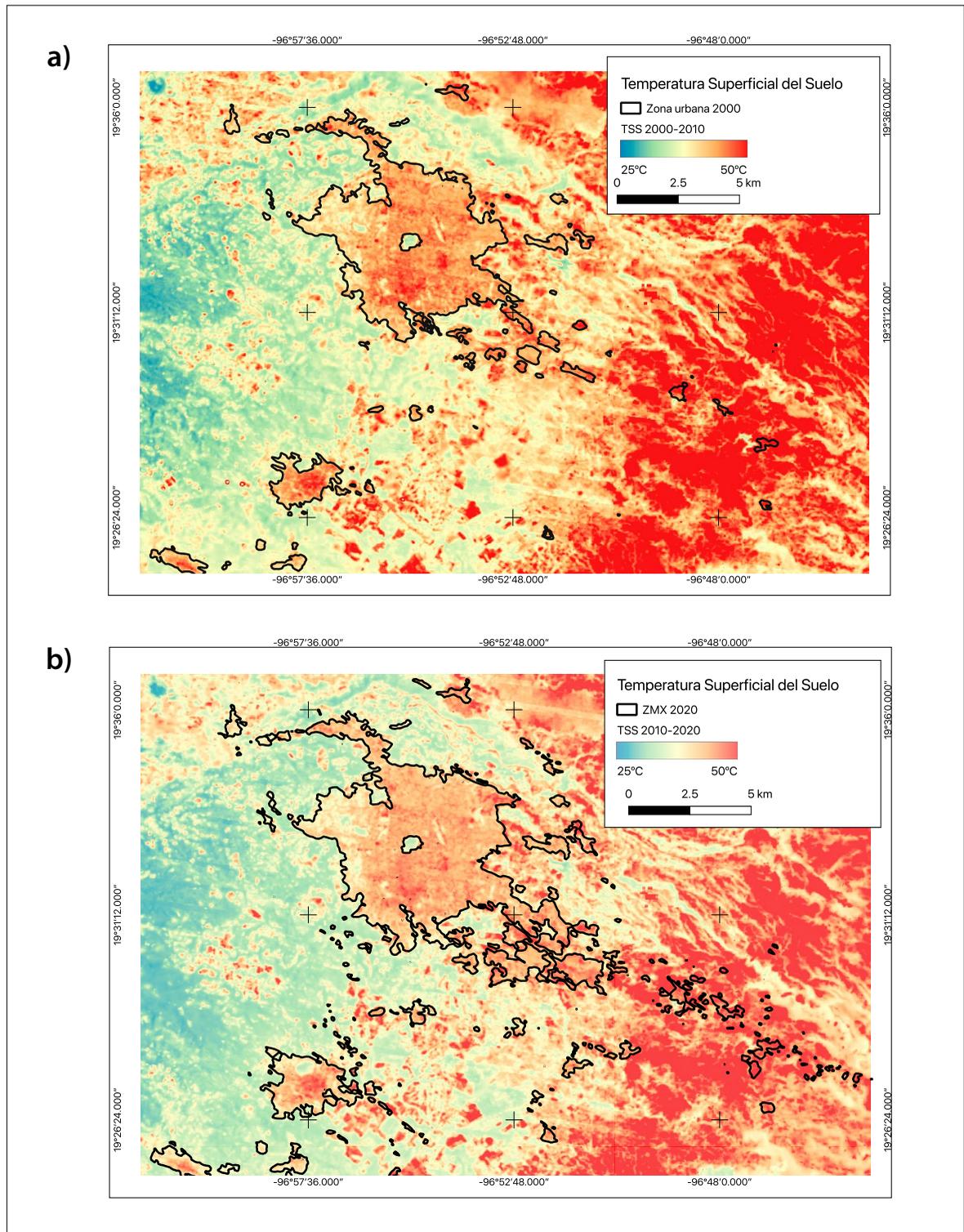


Fig. 4 Promedio anual de temperatura superficial del suelo a) para el periodo 2010-2020 y b) para el periodo 2010-2020. Fuente: Climate Engine (2023).

después de 1990, cuando la señal de disminución en la temperatura máxima es más débil en las estaciones urbanas que en las que mantienen un carácter rural. Para las dos décadas más recientes, con la fase positiva de la AMO (+), el contexto de urbanización densa resulta en que las temperaturas de las zonas urbanas se mantienen altas, contrario al periodo pasado de la misma fase de AMO (+). En otras palabras, entre 1948-1963, las estaciones de la zona urbana permanecieron con temperaturas máximas de entre 21-23 °C, mientras que las recientes se ubican entre 23-25 °C, por lo que se concluye que la urbanización parece haber influido en el aumento de 2 °C aproximadamente, como lo plantearon Tejeda *et al.* (2011). Por el contrario, las estaciones 30452, 30454 y 30135, que se encuentran en un medio provisto con mayor vegetación, tienen temperaturas máximas menores, siguiendo el patrón de temperaturas máximas de las décadas

1950-1960. Una mención especial se puede hacer para el caso de la estación 30452 ubicada en una zona conocida como Briones, que ha mantenido el bosque a su alrededor.

Adicionalmente, a través de un análisis espectral se identificaron las relaciones entre el índice AMO y las temperaturas máximas de la zona de estudio. Se promediaron los datos mensuales de temperatura máxima disponibles del dominio, de tal manera que se obtuvieron valores para todo el periodo de interés. Tanto en el caso de la AMO como de la temperatura máxima, la mayor potencia corresponde al ciclo anual, pero dado que el mayor interés del presente análisis son solo las frecuencias muy bajas (largos periodos), solo se muestra la potencia para periodos mayores a un año, es decir, interanuales y multidecadales. El espectro de potencia se multiplicó por la frecuencia para hacer más evidentes los “picos espectrales” de periodos

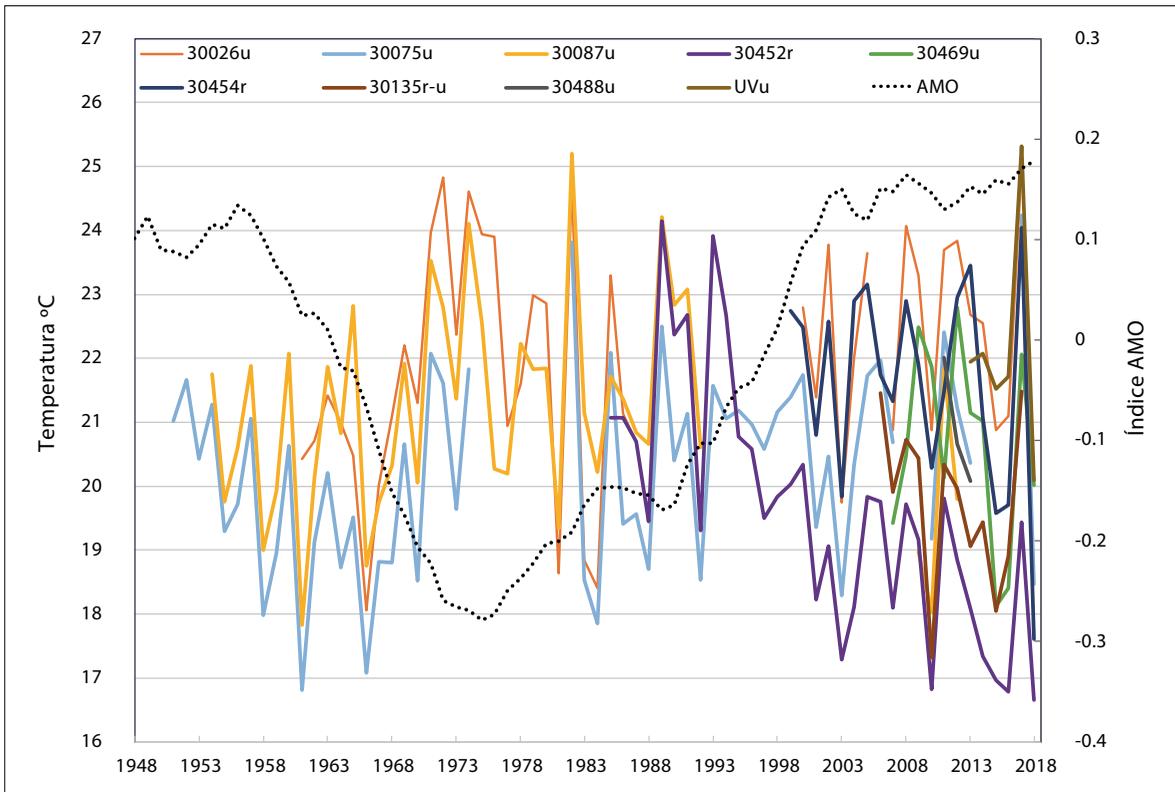


Fig. 5 Promedio anual de temperaturas máximas para estaciones rurales (r) y urbanas (u) que se encuentran dentro de la ZMX y el índice AMO (línea negra punteada).

más cortos (Figura 6). El espectro muestra que el índice AMO tiene gran varianza, principalmente en periodos de alrededor de 30 años (362 meses) y en periodos interanuales de entre 2 y 3.6 años (24 y 45.3 meses, respectivamente). En las bajas frecuencias, la temperatura máxima de la ZMX también exhibe un pico espectral alrededor de los 30 años, así como alta variabilidad entre 2 y 3.6 años, tal cual ocurre con el índice AMO.

Cuando se analiza la coherencia al cuadrado y la diferencia de fase entre el índice AMO y la temperatura máxima de la ZMX, los valores más significativos (mayores de 0.25) corresponden a periodos de más de 30 años (Figura 7). Aunque los hay máximos de coherencia cuadrada para 21.3 y 17.2 meses de periodo, la potencia de AMO correspondiente es muy baja, por lo que su significancia estadística es baja. La diferencia de fase en el periodo de 30 años es alrededor de 180° , lo que significa que las series, en estos periodos están fuera de fase, tal y como se aprecia en la Figura 5, correspondiente a las series de tiempo de AMO y temperatura máxima. La coherencia aumenta ligeramente en la muy baja frecuencia (más de 30 años de periodo) si en el promedio de estaciones solo se considera la

estación de Briones (30452) en el periodo 2000-2020. Aunque hay alta coherencia en periodos de 21 y 17 meses, ésta es resultado de baja potencia en las variaciones correspondientes de la AMO.

Los resultados del análisis espectral para variaciones de baja frecuencia muestran que, de forma natural, las variaciones de muy baja frecuencia de la AMO están anticorrelacionadas con las de temperatura máxima en Xalapa. Sin embargo, en décadas recientes, el efecto de la ICU parece interrumpir dicha relación al mantener una tendencia del calentamiento urbano.

La importancia del uso de suelo como regulador del clima local

La zona de Briones (estación 30452) destaca por permanecer con vegetación y por consiguiente, su temperatura máxima responde a lo esperado. Los registros de temperatura máxima a partir de 1984 indican una tendencia a disminuir luego del año 2000, acorde con la modulación ejercida por la AMO, para periodos de fase positiva en zonas con vegetación natural (Figura 5). El modelo de urbanización de Briones, dentro de la ZMX corresponde a un paisaje de residencias en medio de un denso

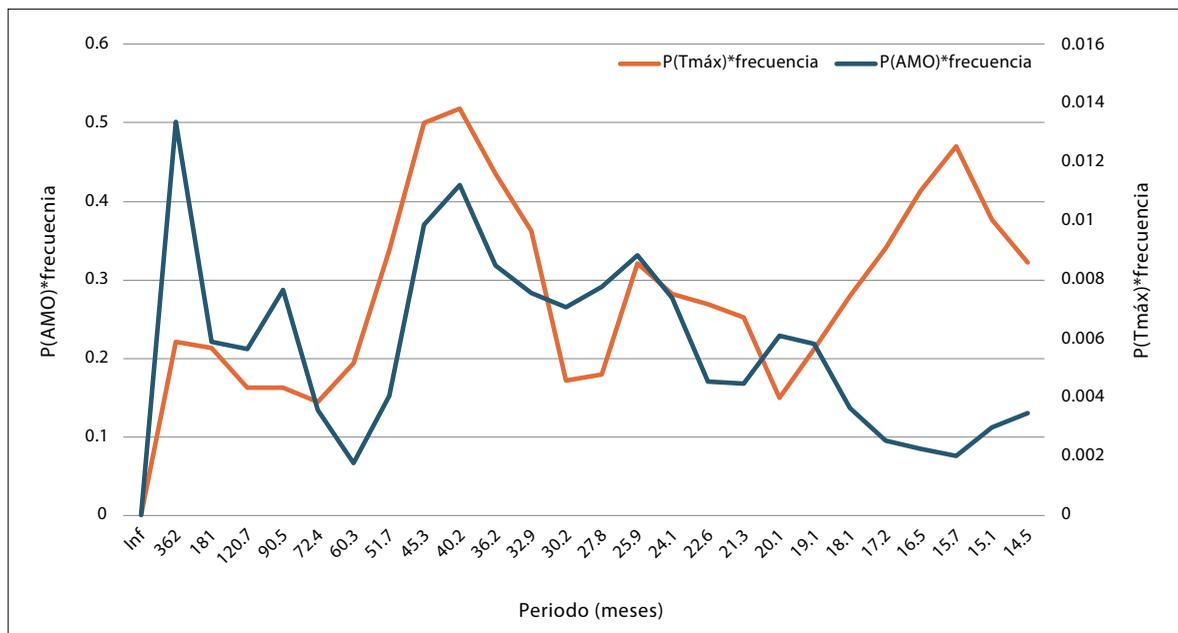


Figura 6. Espectro de potencia multiplicado por la frecuencia para AMO (línea azul) y para la temperatura máxima de la ZMX (línea naranja), obtenido con datos promedios mensuales de la AMO y temperatura máxima del periodo 1951-2020.

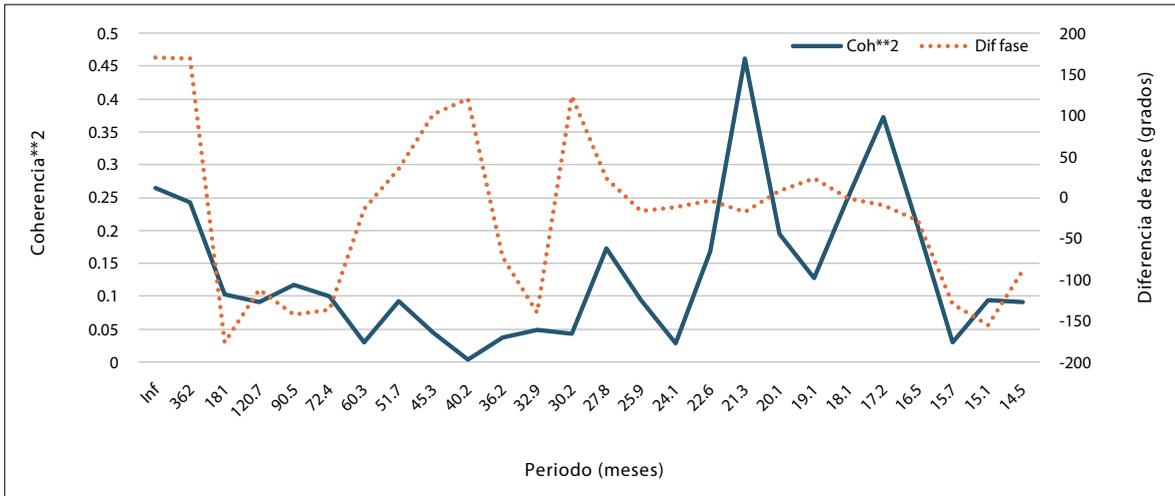


Figura 7. Coherencia al cuadrado (línea azul) y diferencia de fase (línea naranja), entre la serie de valores mensuales de AMO y temperatura máxima en la ZMX para el periodo 1951-2020.

arbolado que actúa como zona de uso de suelo de vegetación natural. De esta manera, la temperatura en este punto contrasta con la zona urbanizada de la ZMX en donde la temperatura máxima es al menos 2 °C mayor. Incluso se observa que la temperatura

media regional en el Golfo de México se eleva en poco más de 1 °C sin que afecte la tendencia de la temperatura en Briones (Figura 8). Esta relación sugiere que más que la temperatura en el Golfo de México, la modulación de la nubosidad y la

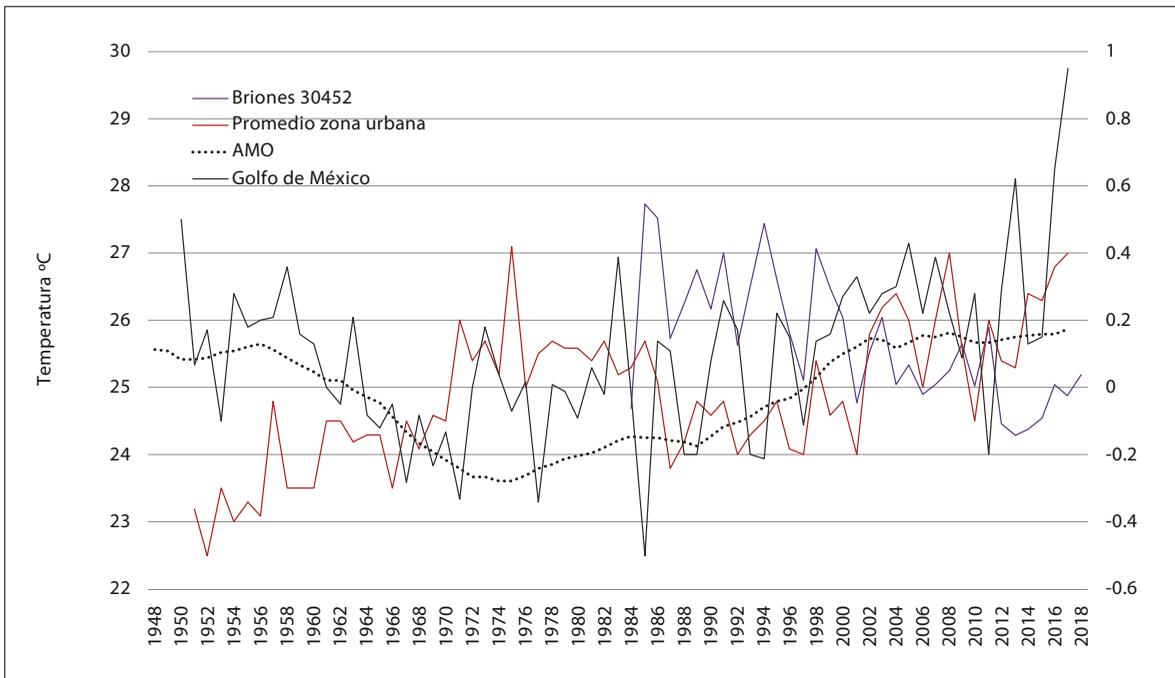


Fig. 8 Promedio temperatura máxima para zona urbana, estación Briones 30452 (rural), índice AMO y anomalías de temperatura del Golfo de México (proxy de calentamiento global).

radiación solar entrante, determinada por procesos dinámicos como el paso de Nortes u ondas del este, es el factor determinante en la vertiente del Golfo de México, y particularmente en zonas con uso de suelo con vegetación.

La extensión urbanizada de Xalapa pasó 10.22 km² en 1950 a 124.4 km² para el año 2020 (SIEGVER, 2021). El mayor crecimiento o expansión urbana se dio cuando las tierras ejidales y comunales pudieron comercializarse, es decir, en la década de los 1990 (Benitez, 2011), en coincidencia con el periodo en que gran parte de la ZMX comienza a experimentar un proceso de calentamiento. Para expandirse, la zona urbana experimentó una pérdida de vegetación que puede ser observada a través del índice de vegetación mejorado (EVI).

En el periodo 2000-2020, al final de la temporada de lluvias de verano, época en la que el EVI alcanza mayores valores, se pueden detectar mínimos relativos en donde la urbanización es más densa, como en el centro de la ciudad de Xalapa (Figura 9). Por el contrario, en las zonas periféricas de la ciudad, los valores de EVI son relativamente altos (mayores a 0.5), reflejo de la relativa conservación de la vegetación. El patrón de valores bajos de EVI en la zona urbana coincide con el de mayores temperaturas de suelo de la Figura 4a.

La tendencia de crecimiento de la urbanización (Figura 1) se da principalmente hacia el este y sureste de la ZMX. Es ahí donde la pérdida de vegetación se refleja en una tendencia negativa del EVI (Figura 10), en donde eran terrenos planos y donde se ubicaban tierras agrícolas y ganaderas, principalmente.

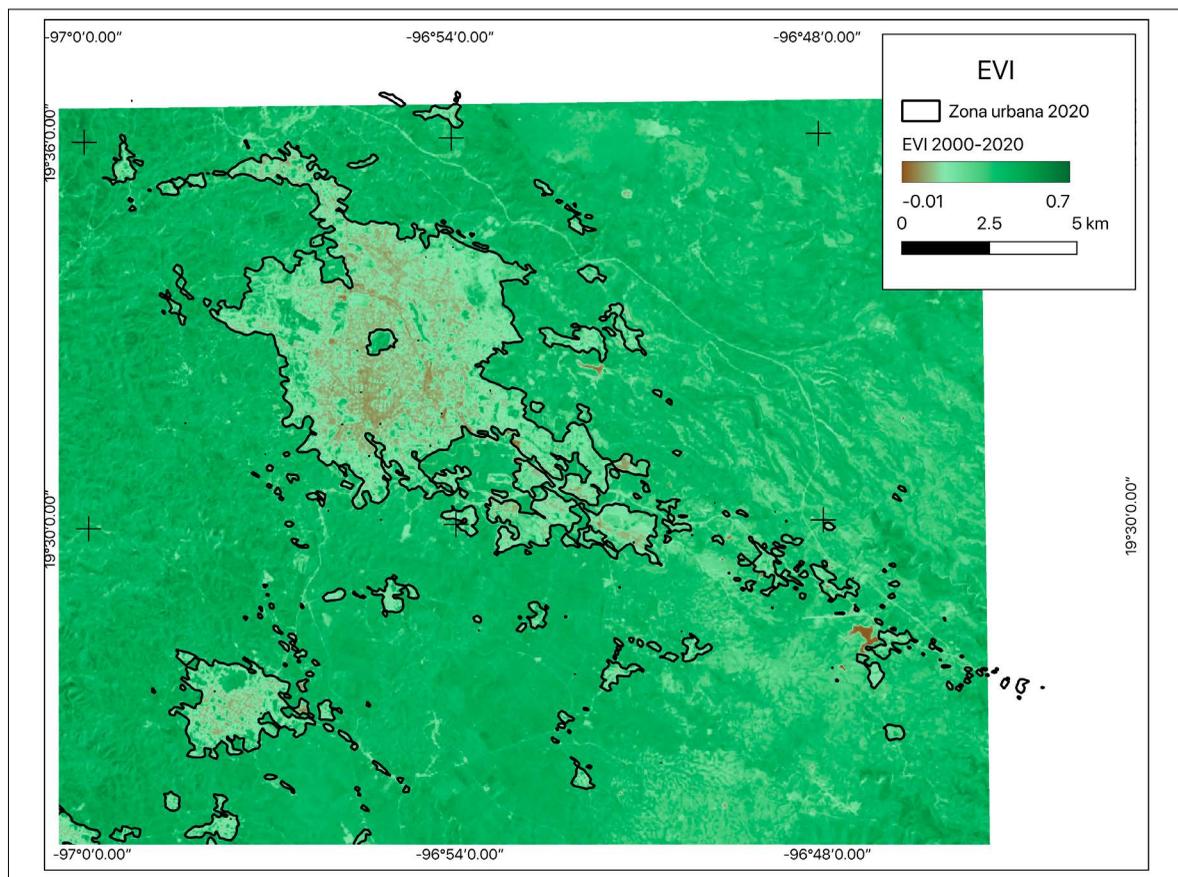


Figura 9. Promedio del Índice de Vegetación Mejorado (EVI) para el periodo 2000-2020. Fuente: Climate Engine (2023).

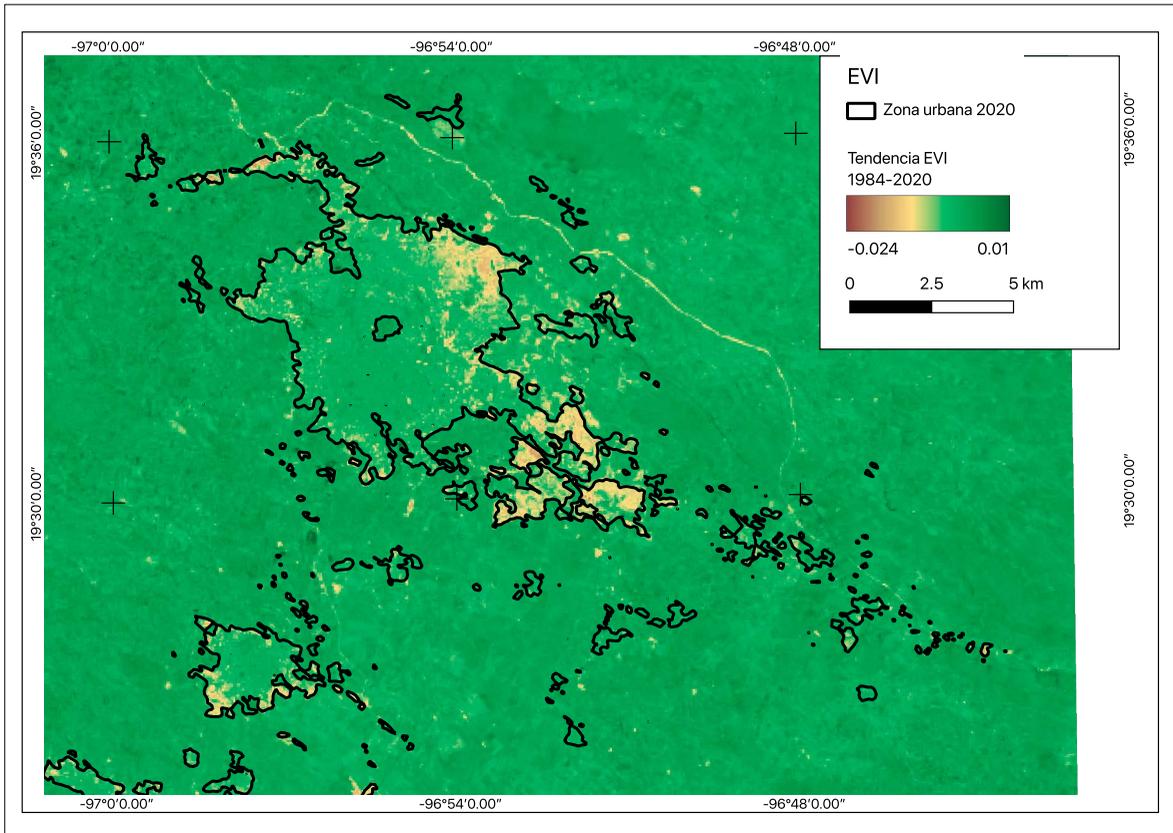


Figura 10. Tendencia del Índice Mejorado de Vegetación (EVI) para el periodo 1984-2020. Fuente: Climate Engine (2023)

La pérdida de vegetación asociada al crecimiento urbano ha resultado en aumentos de temperatura de superficie del suelo que generalmente conllevan a la formación de la ICU.

Así, el forzante climático por cambio de uso de suelo juega un papel importante en las variaciones y tendencias de largo plazo del clima de la ZMX.

Para estimar el impacto de la pérdida de vegetación a través del EVI, se analizó también la tendencia de los cambios en la temperatura de superficie del suelo entre el año 2000 y 2020 (Figura 11). Las zonas que experimentaron un mayor calentamiento corresponden a aquellas donde se perdió la mayor cantidad de vegetación. Así, la urbanización en dos décadas (2000-2020) puede inducir aumentos en la temperatura máxima de más de 2 °C, lo que convierte al cambio de uso de suelo en el principal forzante climático para la ZMX, por enci-

ma de las tendencias de calentamiento global de origen antrópico, o del forzamiento natural dado por la AMO.

DISCUSIÓN

Con la pérdida de servicios ecosistémicos provistos por la vegetación, se elimina una fuente de regulación térmica significativa. Los árboles ayudan a disminuir la temperatura en superficie generada por altos niveles de radiación solar, más la humedad de un suelo vegetado que utiliza esa energía en evapotranspirar, alteran los climas de zonas urbanizadas. El modelo de crecimiento de las ciudades en México es por lo general uno en el que se eliminan árboles y vegetación. Con ello, las temperaturas van en aumento a pesar de la influencia de forzantes

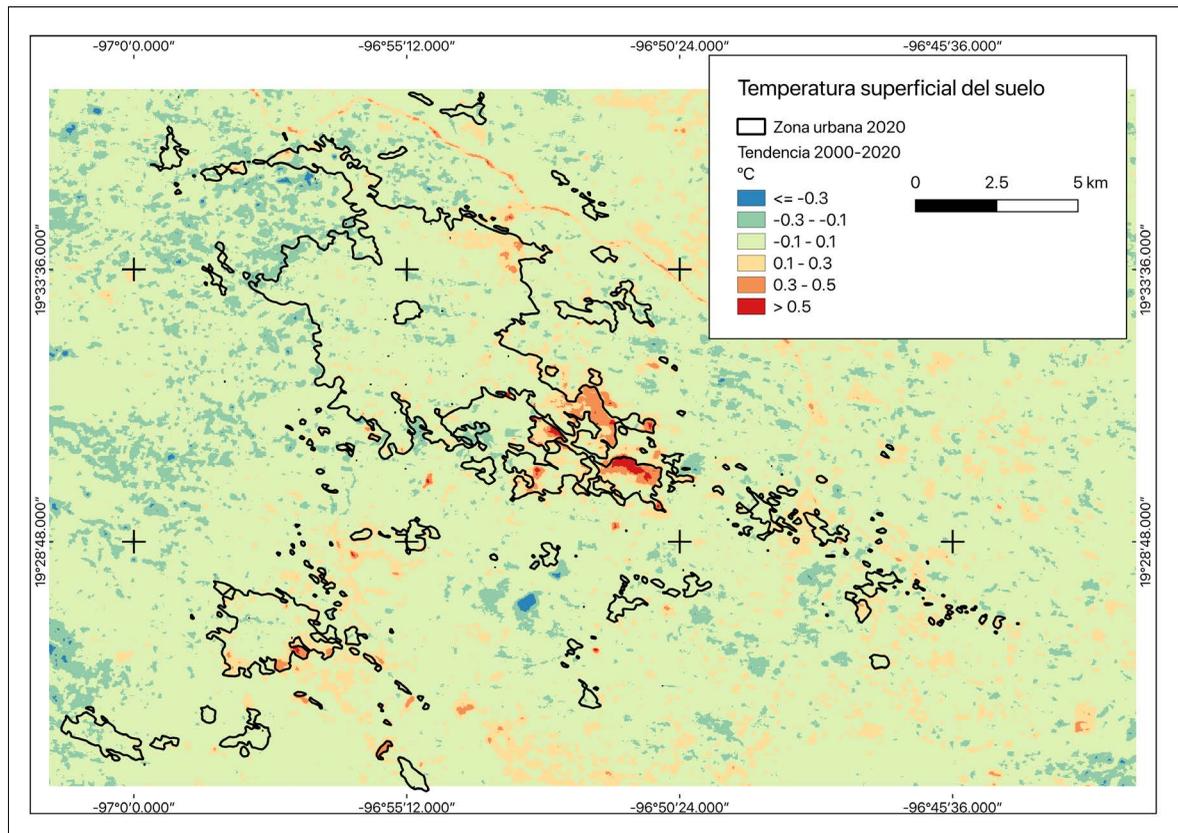


Fig. 11. Tendencia de la temperatura superficial del suelo para el periodo comprendido entre 2000-2020. Fuente: Climate Engine (2023).

naturales, como la AMO que tendería a enfriar el clima, como en la ZMX.

En el presente análisis se encuentra una relación entre la variabilidad natural del clima del Atlántico, como lo es el factor AMO, y el clima en una parte de la vertiente del Golfo de México, la ZMX. Sin embargo, dicha relación desaparece porque el forzante por cambio de uso de suelo adquiere mayor importancia en décadas recientes. Solo en algunas zonas urbanizadas, pero que mantienen alto grado de vegetación, como la colonia de Briones, la relación de variabilidad natural del clima modulada por la AMO parece permanecer.

La forma en que ha crecido la Zona Metropolitana de Xalapa ha tenido consecuencias en las temperaturas máximas. Aunque estas en su mayoría se encuentran con una tendencia positiva, es importante reconocer que no todas las zonas han seguido

el mismo modelo de crecimiento, lo que permite visibilizar que existen formas mediante las cuales aún es posible amortiguar las altas temperaturas y con ello, evitar impactos en la población, como el caso de Briones.

En otro aspecto, aunque la ciudad y su área conurbada se asientan sobre un terreno heterogéneo al encontrar zonas con pendientes abruptas y otras con planicies, y, diferenciales en alturas de entre 1000-1600 msnm, la zona en su conjunto ha presentado un calentamiento inducido por la urbanización, y en el pasado, inducido por la fase negativa de la Oscilación Multidecadal del Atlántico. En próximos años durante los cuales puedan combinarse los factores que producen calentamiento para la zona, será preocupante los efectos que se puedan generar. Al respecto, durante el presente año se registró un fallecimiento en la periferia de

la ciudad, por la presencia de una onda de calor (Vanguardia de Veracruz, 2023), lo que puede ser un alertamiento para las autoridades y la sociedad civil, para implementar medidas de prevención ante un escenario en el que las temperaturas extremas sean cada vez más frecuentes.

En el presente estudio solo fueron abordadas las temperaturas máximas influenciadas por la AMO, pero aún falta por conocer los cambios en la precipitación, misma que también puede ser influenciada por la urbanización (Jáuregui y Romales, 1996).

CONCLUSIONES

La Zona Metropolitana de Xalapa ha ido experimentando cambios en la temperatura máxima durante los últimos 60 años al presentar un promedio de 23.5 °C, hasta antes de 1960, hasta 26 °C entre 2010-2018.

Durante la fase (-) de AMO, las temperaturas máximas alcanzaron hasta 25.5 °C, en mayor medida influenciadas por tal variabilidad natural del clima, ya que esta etapa coincidió con una ZMX poco densa y extendida.

Los análisis de atribución de los cambios de temperatura son importantes en nuestros días para generar propuestas que permitan disminuir tales temperaturas en zonas urbanas debido a la alta exposición de poblaciones que pueden resultar afectadas con la presencia de temperaturas capaces de generar problemas de salud y mortalidad.

El crecimiento urbano de la ZMX debería ser planeado, ya que en adelante se puede esperar una tendencia de incremento de las temperaturas lo que podría generar además de los problemas de salud, problemas en el abastecimiento de energía eléctrica, de abastecimiento de agua y otros problemas adyacentes que disminuyen la calidad de vida de los pobladores. Se sugiere implementar nuevas formas de desarrollos urbanos en los que se establezcan zonas arboladas y lagos, así como programas de gobierno de restauración y conservación de ríos y bosques, parques y camellones dentro y en los alrededores de las zonas urbanas, para evitar el incremento de temperaturas consideradas de peligro.

AGRADECIMIENTOS

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA), por la beca posdoctoral (POSDOC) proporcionada a Nuria Vargas, a la Dra. Mary Frances Rodríguez Van Gort por su asesoría en el posdoc, al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT IN111023 Escenarios de Riesgo Climático Urbano).

REFERENCIAS

- Azhar, M., Nicoli, D., Kucharski, F., Almazroui, M., Tippet, K., Bellucci, A., Ruggieri, P e In-Sik, K. (2020). Atlantic Ocean influence on Middle East summer surface air temperature. *Climate and Atmospheric Science*, 1-8.
- Azuz-Adeath, I., González-Campos, C. y Cuevas-Corona, A. (2019). Predicting the Temporal Structure of the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO), for Agriculture Management in Mexico's Coastal Zone. *Journal of Coastal Research*, 2010-2026. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-18-00030.1>
- Barradas, V. (1987). Evidencia del Efecto. de "Isla Térmica" en Jalapa, Veracruz. *Geofísica*, 125-135.
- Benitez, G. (2011). *Crecimiento de la población y expansión urbana de la ciudad de Xalapa, Veracruz y sus efectos sobre la vegetación y agroecosistemas*. Tesis. Manlio Fabio Altamirano, Veracruz: Colegio de Posgraduados.
- García-Cueto, O., Jáuregui, E., Toudert, D. y A. Tejada-Martínez. (2007). Detection of the urban heat island in Mexicali, B. C., Mexico and its relationship with land use. *Atmósfera*, 111-131.
- Gunawardena, K., Wells, M. y Kershaw, T. (2017). Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island. *Science of the Total Environment*, 1040-1055. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.158>
- Higuera, E. (2009). *El Reto de la Ciudad Habitable y Sostenible*. Pamplona: DAPP.
- Howard, L. (1818). *The climate of London*. International Association of Urban Climate.
- INEGI-CONAPO. (2004). *Delimitación de Zonas Metropolitanas 2000*. México, D.F.: INEGI, CONAPO, SEDESOL.
- IPCC. (2000). *Emissions Scenarios*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2007). *Resumen para Responsables de Políticas en Cambio Climático: impactos y vulnerabilidad*. Cambridge University Press.

- Jáuregui, E. (1993). La isla de calor urbano de la Ciudad de México a finales del siglo XIX. *Investigaciones Geográficas*, 31-39.
- Jáuregui, E. (2005). Possible impact of urbanization on the thermal climate of some large cities in Mexico. *Atmósfera*, 249-252.
- Jáuregui, E. (2009). The heat spells of Mexico city. *Investigaciones Geográficas*, 71-76.
- Jáuregui, E. y E. Romales. (1996). Urban effects on convective precipitation in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 3383-3389. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(96\)00041-6](https://doi.org/10.1016/1352-2310(96)00041-6)
- Jae-Heung P. y T. Li. (2018). Interdecadal Modulation of El Niño-Tropical North Atlantic teleconnection by the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Climate Dynamics*, 5345-5360. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4452-4>
- Manoli, G., Fatichi, S., Schlöpfer, M. et al. (2019). Magnitud of urban heat islands largely explained by climate and population. *Nature*, 55-60. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1512-9>
- Méndez, M. y V. Magaña. (2010). Regional Aspects of Prolonged Meteorological Droughts over Mexico and Central America. *U. S. Clivar Drought*, 1175-1188. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3080.1>
- Méndez-Romero, E. (2017). *Alteraciones térmicas derivadas de la urbanización en la ciudad de Xalapa, Veracruz. Análisis espacial y temporal 1982-2015*. Veracruz, México.
- NCAR. (2023). *NCAR Climate Data Guide*. Obtenido de <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/atlantic-multi-decadal-oscillation-amo>
- Oke, T. R. (1967). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment*, 769-779. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6)
- Oke, T., G., Mills, A. Christen y Voogt, J. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>
- Pérez-Córdova S. J. y Welsh, C. (2020). Evaluación de peligro por inundación en Xalapa, Veracruz, México. *UVserva*, 285-297. <https://doi.org/10.25009/uvs.v0i10.2692>
- Pesaresi, M. y P. Politis. (23 de 07 de 2023). *Global Human Settlements*. Obtenido de GHS-BUILT-S R2023A - GHS built-up surface grid, derived from Sentinel2 composite and Landsat, multitemporal (1975-2030) European Commission, Joint Research Centre: <https://ghsl.jrc.ec.europa.eu/download.php>
- Schwaab, J, Meier, R., Mussetti, G., Seneviratne, S., Bürgi, C. y E. Davin. (2021). The role of urban trees in reducing land surface temperatures in European cities. *Nature Communications*, 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26768-w>
- SEDATU-INEGI. (2015). *Delimitación de las zonas metropolitanas de México*. INEGI.
- SIEGVER. (2021). *Sistema de Información Estadística y Geográfica del Estado de Veracruz*. Obtenido de http://ceieg.veracruz.gob.mx/wp-content/uploads/sites/21/2021/06/XALAPA_2021.pdf
- Tejeda, A. y F. Acevedo. (1990). Alteraciones climáticas por la Urbanización en Xalapa, Veracruz. *La Ciencia y el Hombre*, 37-48.
- Tejeda, A., Pérez, M. y Méndez, I. (2020). *Un Laboratorio Natural del Clima: La Interacción Costa Montaña en el Centro del Golfo de México*. Universidad Veracruzana. <https://doi.org/10.25009/uv.2271.1470>
- Tejeda-Martínez, A., Luyando, E. y E. Jáuregui. (2011). Average conditions of thermal stress in Mexican cities which more than one million inhabitants in the face of climate change. *Atmósfera*, 15-30.
- Vanguardia de Veracruz. (2023, 23 de junio). Presunto golpe de calor le habría arrebatado la vida a indigente. *Vanguardia de Veracruz*. <https://doi.org/10.15366/philobiblion2022.16.001>
- Vargas, N. y V. Magaña. (2020). Warm spells and climate risk to human health in the Mexico City Metropolitan Area. *Weather, Climate and Society*, 351-365. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-19-0096.1>
- Vienna, E. P. (2018). *Urban Heat Island Strategy City of Vienna*. Obtenido de <https://www.lifetreecheck.eu/getattachment/2fff480d-c43d-4bb1-ab53-3ef9b0ea6e7e/attachment%22>
- Von Thaden, J.J., Binnquist-Cervantes, G., Pérez-Maqueo, O. y Lithgow, D. (2022). Half-Century of Forest Change in a Neotropical Peri-Urban Landscape: Drivers and Trends. *Land*, 2-14. <https://doi.org/10.3390/land11040522>