

**CLIMATOLOGÍA DE LAS
CONDICIONES PROPICIAS PARA
ALTAS CONCENTRACIONES DE
OZONO: UN ENFOQUE EN LA
VARIABILIDAD TÉRMICA DE LA
ZMVM**

INTRODUCCIÓN

El clima es el promedio del estado del tiempo meteorológico durante largos períodos, al menos de 30 años, incluye variaciones respecto a la media de variables como temperatura, precipitación, humedad relativa, viento o presión atmosférica.

El cambio climático se refiere a la modificación a largo plazo del estado del clima global y/o regional, la evidencia científica señala que el cambio climático actual es causado principalmente por el aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI), producto de las emisiones asociadas a las actividades humanas.

De acuerdo al informe especial del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) de 2018, si el calentamiento global continúa al ritmo actual, se prevé un aumento de 1.5°C entre 2030 y 2052. Este aumento es un riesgo tanto para sistemas naturales como humanos, los cuales varían de acuerdo a la magnitud del calentamiento, la ubicación geográfica y las medidas de adaptación y mitigación implementadas.

Un estudio climatológico permite, entre otras cosas, tener

un marco de referencia amplio respecto a las condiciones atmosféricas de un lugar. Conocer los patrones climatológicos facilita entender cómo la variabilidad en la temperatura a largo plazo puede afectar la probabilidad de un evento de contingencia ambiental.

Por otro lado, los análisis meteorológicos se enfocan en describir las condiciones de la atmósfera en un momento específico. Por ejemplo, durante una contingencia por ozono, estos análisis ayudan a identificar las variables que favorecen la formación de este contaminante.

En el caso de contaminación por ozono, la atmósfera requiere la presencia de precursores (NOx y COV), que bajo la influencia de la radiación UV rompen enlaces formando el ozono. Estas reacciones a su vez son influenciadas por la temperatura que acelera la reacción.

El estudio de la relación de la temperatura y los eventos de contingencia por ozono en la Zona Metropolitana del Valle de México permite cuantificar la contribución de la temperatura al aumento de este contaminante lo que a su vez, permitirá tomar medidas de mitigación más informadas.



Foto: David Gracia de Pexels

La **meteorología** estudia condiciones atmosféricas asociadas a la presencia de sistemas meteorológicos en una región como frentes, vaguadas o ciclones tropicales y sus efectos en variables como la temperatura, vapor de agua, viento y precipitación. Su estudio es en un período corto de tiempo y en zonas específicas, por ejemplo, el pronóstico diario de precipitación en una ciudad. La **climatología**, en cambio, estudia los patrones y variaciones a largo plazo de las condiciones atmosféricas antes mencionadas, caracterizando las condiciones atmosféricas de un lugar.

El IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático, por sus siglas en inglés) es un organismo de la ONU que brinda información e informes dedicados a la evaluación del cambio climático que son fundamentales para el desarrollo de políticas públicas y toma de decisiones informadas, consta de tres grupos de trabajo, especializados en el análisis de diferentes vertientes relacionadas al cambio climático.

- **Grupo de Trabajo 1** (WG1, por sus siglas en inglés): Se centra en evaluar las bases científicas del cambio climático, compila la información científica relacionada con el sistema climático, las causas del cambio climático, así como los efectos observados y proyectados del cambio climático.
- **Grupo de Trabajo 2** (WG2, por sus siglas en inglés): Se enfoca en la evaluación de los impactos, la adaptación y la vulnerabilidad asociados al cambio climático. Analiza cómo el cambio climático afecta a los sistemas naturales y humanos.
- **Grupo de Trabajo 3** (WG3, por sus siglas en inglés): Se enfocan en la evaluación de políticas y alternativas de mitigación al cambio climático. Examinan cuestiones económicas, sociales y tecnológicas relacionadas con la mitigación.

ÍNDICE

- 01** CAMBIOS DE LA TEMPERATURA EN EL CENTRO DE MÉXICO EN EL PERIODO 1960-2020.
- 02** IMPACTO DE LA TEMPERATURA EN LAS CONCENTRACIONES DE OZONO.
- 03** CRÉDITOS.



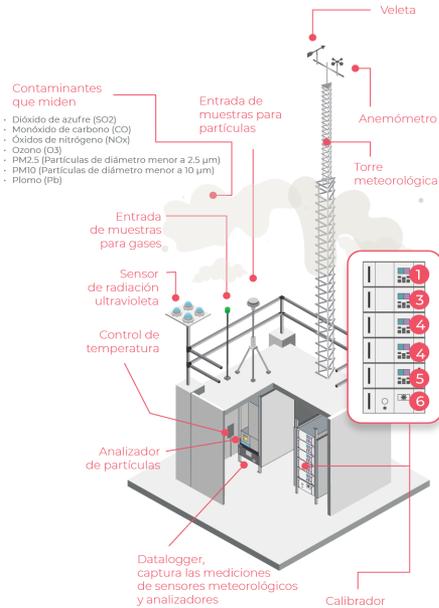
CAMBIOS DE LA TEMPERATURA EN EL CENTRO DE MÉXICO EN EL PERIODO 1960-2020

Se analizaron los patrones climáticos, tendencias y eventos extremos a través de observaciones diarias de temperatura máxima y mínima en el Centro de México.

Las observaciones de temperatura a largo plazo permiten identificar patrones y tendencias del clima, desarrollar modelos y mejorar la capacidad predictiva. También son una herramienta para la identificación de la frecuencia y severidad de los eventos extremos.

Con el objetivo de caracterizar la variabilidad de la temperatura

del aire en el Centro de México, para este estudio se emplearon e integraron los datos recolectados por distintas redes de observación meteorológica, del periodo 1961-2021. Los datos fueron obtenidos de la Red de Observatorios Meteorológicos del Sistema Meteorológico Nacional



Esquema de observatorio atmosférico: Cuentan con el instrumental necesario para el registro preciso de las condiciones de tiempo meteorológico como: humedad relativa, temperatura, presión atmosférica, evaporación y precipitación. A diferencia de las estaciones meteorológicas, los observatorios son instalaciones grandes y con instrumentación especializada que garantizan el monitoreo a largo plazo.

Las redes de monitoreo con las que cuenta el SMN son:

- **Red sinóptica de superficie.** Conformada por 77 Observatorios
- **Red de estaciones climatológicas convencionales.** Conformada por 5,500 estaciones.
- **Red de estaciones automáticas.** Conformada por 96 estaciones

Además, para este estudio se consideró la información de las redes de la UNAM:

- **Programa de Estaciones Meteorológicas del Bachillerato Universitario (PEMBU).** Conformada por 21 estaciones.

Y de la red de observaciones meteorológicas de la CDMX

- **Red de Meteorología y Radiación Solar.** Conformada por 26 estaciones.

Los fenómenos meteorológicos extremos son eventos atmosféricos poco frecuentes debido a su intensidad y duración. Estos eventos pueden ser olas de calor, olas de frío, sequías, precipitaciones e inundaciones, así como huracanes. En particular, los eventos extremos de temperatura, como las olas de calor o frío, son cada vez más frecuentes debido al calentamiento global del planeta.

El último informe del IPCC (AR6) define eventos extremos de temperatura como aquellos que

exceden o están por debajo de los umbrales de temperatura máxima o mínima, ya sean absolutos o relativos. Los umbrales absolutos varían según la zona y motivo específico, mientras que los relativos se aplican ampliamente sin considerar el lugar geográfico. Comúnmente los umbrales relativos utilizados son el **percentil 90** para las temperaturas máximas y el percentil 10 para las temperaturas mínimas.

Percentil: Es una medida estadística que indica en qué posición se encuentra un valor dentro de un conjunto de datos ordenados de menor a mayor, es representado con el porcentaje de datos iguales o inferiores a ese valor. Por ejemplo, si en un conjunto de datos de temperatura diaria el valor de 24° C está en el percentil 70, significa que el 70% de los días tuvieron temperaturas iguales o menores a 24°C y que el 30% de los días tuvieron temperaturas mayores a 24°C.

Para el análisis de eventos extremos, en este estudio se determinaron los percentiles 90 y 10 por fecha del año y considerando todo el periodo de estudio (1961-2021).

Los eventos extremos de temperatura analizados fueron:



- **Días cálidos:** Cuando la temperatura máxima de un día en particular es mayor al percentil 90 de la temperatura máxima.



- **Noches frías:** Cuando la temperatura mínima de un día en particular es menor al percentil 10 de la temperatura mínima.



- **Heladas:** Cuando la temperatura mínima de un día en particular es menor a 0°C. Las heladas se determinan con un umbral absoluto.



- **Heladas por estación:** De acuerdo al periodo de ocurrencia, si se presentaron antes del invierno, se consideran tempranas, cuando ocurren después del invierno, se consideran tardías.

Los resultados consideran los promedios por década de eventos extremos de temperatura, así como las anomalías de eventos extremos por década.

1961 - 1991

El número de días cálidos en cada región se encuentra en el mismo rango.

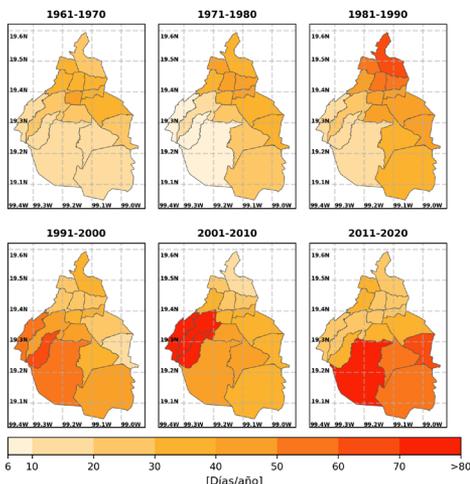
1971 - 1980
1981 - 1991

En el norte de la ZMVM, se observa un incremento de días cálidos.

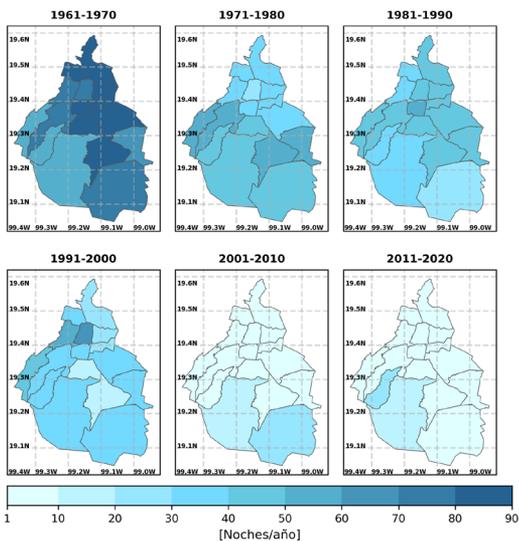
2001 - 2010
2011 - 2020

Se observa un incremento importante de días cálidos en toda la ZMVM, principalmente en la CDMX y su zona conurbada.

Días cálidos anuales promedio por década



Noches frías anuales promedio por década



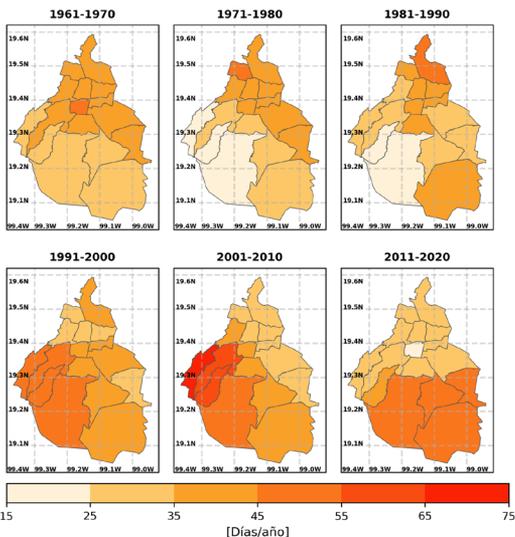
1961 - 1970
1971 - 1980
1981 - 1990

El centro de la CDMX experimentó un mayor número de noches frías

2001 - 2010
2011 - 2020

El centro de la CDMX tuvo menos noches frías en comparación con sus alrededores.

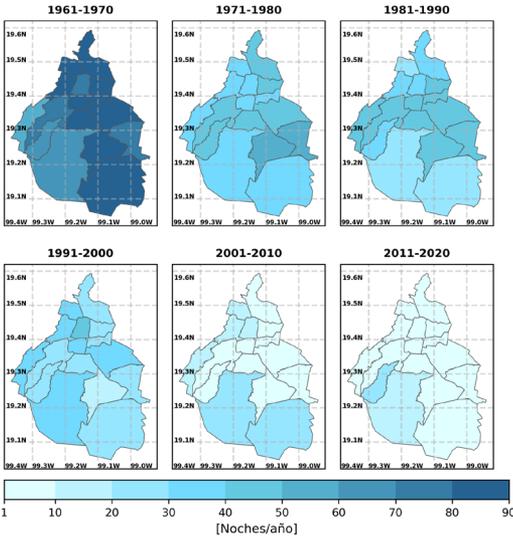
Días cálidos anuales promedio por década



1961 - 1970
1971 - 1980
1981 - 1990
1991 - 2000
2001 - 2010
2011 - 2020

Se observa que, en general, los días cálidos se distribuyen espacialmente y temporalmente. A lo largo de las décadas de estudio la CDMX aumentaron el número de días cálidos.

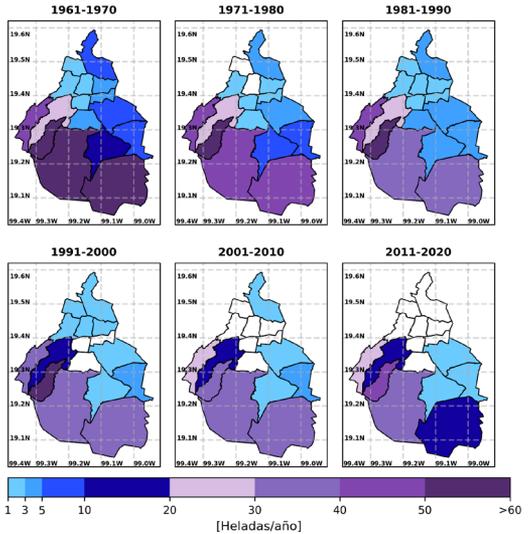
Noches frías anuales promedio por década



1961 - 1970
1971 - 1980
1981 - 1990

Las temperaturas más bajas del periodo de estudio.

Heladas anuales promedio por década



1961 - 1970
1971 - 1980
1981 - 1990

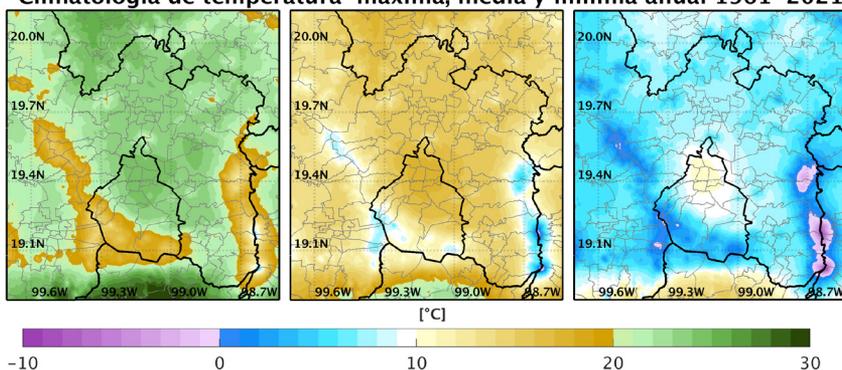
En el centro de la CDMX totalmente urbanizado se experimentaron pocas heladas.

2001 - 2010
2011 - 2020

Se dejaron de presentar heladas. En general, sin importar la estación del año, el número de heladas se ha reducido con el tiempo.

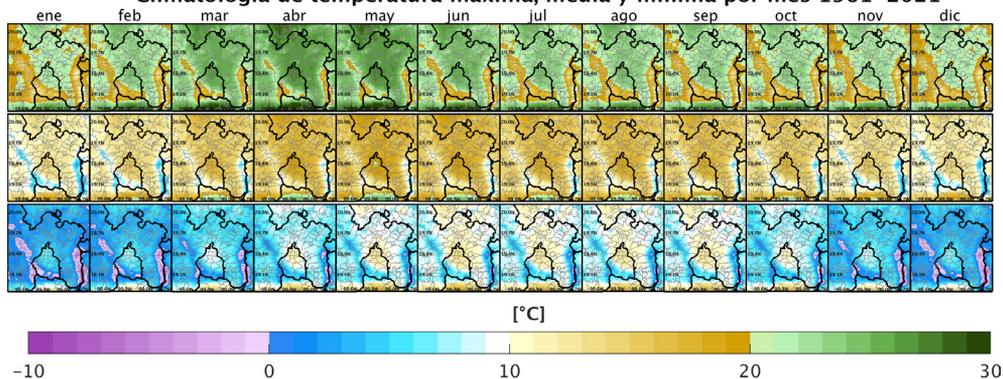
La caracterización climatológica de la temperatura en el Centro de México implica un estudio de largo plazo, permitiendo caracterizar el ciclo anual e identificar periodos cálidos o fríos, así como eventos extremos en la región.

Climatología de temperatura máxima, media y mínima anual 1961-2021



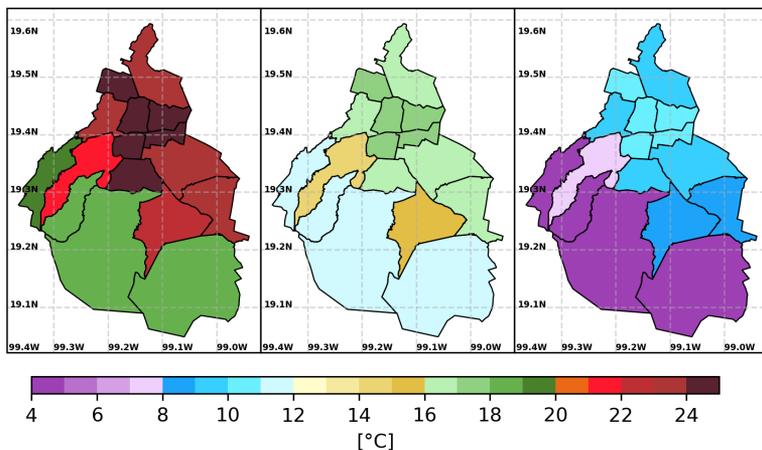
La climatología anual de temperatura máxima, media y mínima revela que el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, Cumbres del Ajusco y Cumbres Sierra Nevada comparten las temperaturas más bajas en los tres escenarios. En contraste, las alcaldías de la Ciudad de México y el Norte de Morelos registran las temperaturas más elevadas.

Climatología de temperatura máxima, media y mínima por mes 1961-2021



Las temperaturas más altas a lo largo del año en la ZMVM se registran en los meses marzo, abril y mayo. Los meses con temperaturas más bajas son diciembre, enero y febrero. Finalmente, los meses correspondientes a la temporada de lluvias, durante el verano, tienen temperaturas mínimas más altas aunque las temperaturas máximas son más bajas que las observadas en primavera

Climatología 1961-2021 para las alcaldías de la CDMX



Climatología de la temperatura máxima, media y mínima, especialmente promediada para las alcaldías de la Ciudad de México. Las temperaturas máximas más altas se localizan en las alcaldías centro, norte y poniente (Benito Juárez, Coyoacán, Venustiano Carranza, Miguel Hidalgo, Iztapalapa, Gustavo A. Madero, Azcapotzalco y Tláhuac). Por otro lado, las temperaturas medias mínimas más bajas se registraron en las alcaldías al sur y sur poniente de la CDMX (Cuajimalpa de Morelos, Álvaro Obregón, La Magdalena Contreras, Tlalpan, Xochimilco y Milpa Alta).



Foto: Fernando Paleta de Pexels

IMPACTO DE LA TEMPERATURA EN LAS CONCENTRACIONES DE OZONO

Las altas temperaturas influyen en las concentraciones de ozono en la Zona Metropolitana del Valle de México

Conocer la climatología y las condiciones meteorológicas de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) es crucial para comprender la dispersión de contaminantes y anticipar contingencias ambientales.

Especialmente durante la temporada seca y caliente, de marzo a mayo, la Zona Metropolitana del Valle de México experimenta concentraciones elevadas de ozono. Factores como la presencia de precursores de ozono (Óxidos de Nitrógeno, NOX y Compuestos Orgánicos Volátiles, COV), la radiación solar intensa, altas temperaturas, vientos débiles e inhibición de dispersión vertical, favorecen la formación y acumulación de ozono, desencadenando contingencias ambientales. Es por eso que este periodo se conoce como la temporada de ozono.

En la década de 1990, la Zona Metropolitana del Valle de México enfrentó Altas concentraciones de ozono y otros contaminantes como azufre, partículas PM10 y PM2.5. Sin embargo, la implementación de medidas específicas logró reducir estas concentraciones y mejorar significativamente la calidad del aire. Entre las medidas adoptadas se encuentran:



Hoy no Circula y Programa de Verificación Vehicular para vehículos de pasajeros

1989



1991

Cierre de la Refinería 18 de Marzo

Reemplazo de combustóleo por gas natural en termoeléctricas

1992



1993

Introducción de convertidores catalíticos de 3 vías en vehículos de pasajeros nuevos

Sistemas de recuperación de vapores en centros de distribución de PEMEX

1995



1996

Sistemas de recuperación de vapores en gasolineras de la ZMVM

Reformulación de la gasolina

1997



1998

Programa de gas natural para vehículos pesados de pasajeros y de carga

Programa de renovación de convertidores catalíticos

1999



2002

Renovación de flota de transporte público

Primer corredor confinado para transporte público en Avenida Insurgentes

2005



2008

Programa Hoy No Circula Sabatino

Gasolina con niveles de azufre ≤ 30 ppb en la CDMX

2010



2012

Autopista urbana Norte-Sur

Renovación del Programa Hoy No Circula Sabatino

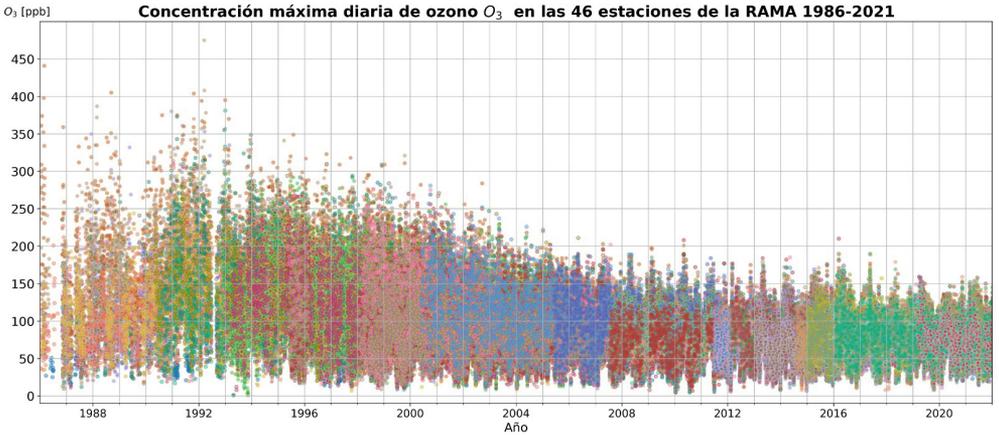
2014



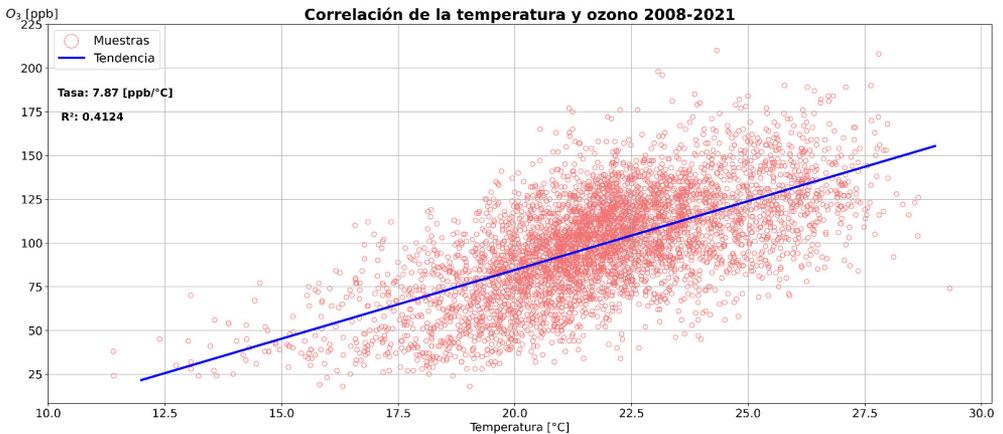
2015

Renovación del Programa Hoy No Circula con restricciones basado en emisiones

Las mediciones horarias de contaminantes realizadas por las estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) de la Secretaría de Medio Ambiente (SEDEMA) evidencian una disminución general de las concentraciones de contaminantes atmosféricos.



En este estudio se analizó la correlación entre temperatura y ozono en el periodo 2008 a 2021, encontrando que efectivamente los valores altos de ozono se encuentran relacionados a temperaturas relativamente altas



Este análisis mostró que no se activaron contingencias a temperaturas por debajo de 22°C durante el periodo 2008-2021. Esto equivale al percentil 68.5, es decir, el 68.5% de las temperaturas máximas diarias registradas en el periodo de 1986-2021 fueron iguales o inferiores a 22°C.

De acuerdo a la regresión lineal, un aumento o disminución de un grado en la temperatura se asocia con un cambio de aproximadamente 7 ppb de ozono. La temperatura explica alrededor del 40% de la variabilidad observada en los niveles de ozono y sólo ocurren contingencias cuando la temperatura máxima es mayor a 22°C.

Acorde a los registros de la SEDEMA, durante el periodo 2008-2021 ocurrieron 20 contingencias por ozono en la ZMVM.

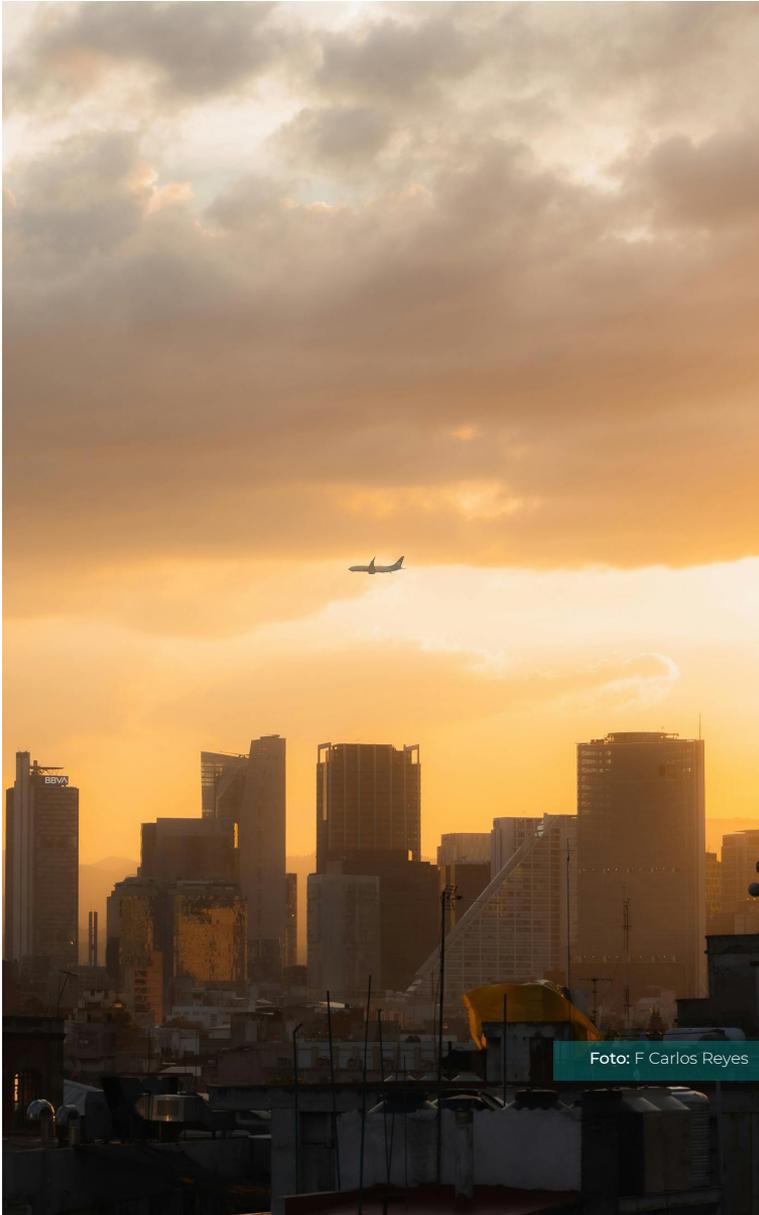


Foto: F Carlos Reyes

CRÉDITOS

INVESTIGACIÓN:

Fernando Alexis Durango Mendoza

Jorge Zavala Hidalgo

Rosario de Lourdes Romero Centeno

Erika Danaé López Espinoza

REVISORES:

Jorge Zavala Hidalgo

Angelica Pedraza Díaz

CONTENIDO Y DISEÑO:

Silvia Sánchez Ramírez

Guadalupe Segura Chávez

Este estudio fue financiado por la CDMX a través del proyecto SECTEI/168/2022, la Coordinación de la Investigación Científica y el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la UNAM. También reconocemos la valiosa colaboración de todas las investigadoras e investigadores que han contribuido al desarrollo de este proyecto.

**INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA
ATMÓSFERA Y CAMBIO CLIMÁTICO**

