INFORME ANUAL

CALIDAD DEL AIRE

Ciudad de México

2022

Claudia Sheinbaum Pardo
Jefa de Gobierno de la Ciudad de México

Marina Robles García
Secretaria del Medio Ambiente

Sergio Zirath Hernández Villaseñor
Director General de Calidad del Aire

Olivia Rivera Hernández
Directora de Monitoreo de Calidad del Aire

Mónica del Carmen Jaimes Palomera
Subdirectora de Análisis y Modelación

Alfredo Alfonso Soler
Subdirector de Análisis Meteorológico

Miguel Sánchez Rodríguez
Subdirector de Monitoreo de Calidad del Aire

José Luis del Río Jáuregui
Subdirector de Sistemas y Comunicaciones

Presentación

Durante 2022 hubo cambios importantes en México, ya que se eliminó el horario de verano después de 26 años de aplicar dicha medida. En el contexto ambiental, la mariposa monarca se declaró como especie en peligro de extinción a causa de la tala clandestina en los bosques de Michoacán. En calidad del aire, en un análisis realizado en 70 capitales del mundo se observó que la CDMX logró reducir la concentración de $PM_{2.5}$ en un 3.3 %, la cual fue la más alta de todas las capitales de América. La calidad del aire es un tema de interés general y cada vez se tiene más información respecto a las variables que influyen, como la radiación solar, temperatura, los patrones del viento, las características geográficas, la temporalidad estacional, así como la cantidad de emisiones.

A finales del 2021 se hicieron actualizaciones importantes para cuatro Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de calidad del aire y ese mismo año entraron en vigor durante los últimos días de diciembre 2021: la **NOM-023-SSA1-2021** y **NOM-025-SSA1-2021**, con los límites para NO_2 y partículas, respectivamente, entraron en vigor el 26 de diciembre; la **NOM-020-SSA1-2021** de ozono inició el 27 de diciembre y finalmente; la **NOM-021-SSA1-2021**, correspondiente a monóxido de carbono entró en vigor 28 de diciembre del 2021. La normatividad de calidad del aire se evalúa anualmente, por lo que dichas actualizaciones se analizaron hasta que se completa el año 2022.

En este informe anual contiene el comportamiento de los contaminantes atmosféricos durante el 2022, por lo que se presenta la evaluación del cumplimiento de la normatividad actualizada para cada uno de los contaminantes criterio, así como el análisis de las variables meteorológicas que influyen en la calidad del aire. Se incluye el estudio de los contaminantes principales y sus tendencias desde 1995 con la finalidad de analizar el cambio en los niveles de concentración a través del tiempo. En este informe se agregó la historia del Índice de Calidad del Aire en la CDMX y las actualizaciones que conllevaron al Índice AIRE y SALUD, aplicado a nivel nacional. Posteriormente, se presenta el análisis sobre los seis eventos de contingencias ocasionadas por ozono y del comportamiento del depósito atmosférico, que incluye la caracterización de la lluvia ácida en la ZMCM.

En la ZMCM, este 2022 registró un total de 123 días limpios, en los que ningún contaminante rebasó su normatividad de calidad del aire. En cuanto a las contingencias, este año no hubo eventos de alta concentración de partículas; sin embargo, en ozono se activaron seis episodios, de las cuales uno de ellos tuvo una duración de 51 horas en total. Este aumento de contingencias se relaciona con factores meteorológicos y cambios en las emisiones, debido a que ya no había restricciones por la pandemia COVID-19 y las actividades regresaron a la normalidad, en consecuencia, se presentaron mayores niveles de contaminantes.

Secretaría del Medio Ambiente
Dirección de Monitoreo de la Calidad del Aire

Elaboración del documento
Mónica Jaimes Palomera,
Cintia Gabriela Reséndiz Martínez,
Citlalli Mendoza Munguía,
Ángel Fragoso Chino,
Milena Lemes Rosales,
Jorge Lara Osorio.

Gráficas y estadísticos
Citlalli Mendoza Munguía,
Daniel Eusebio Quintero Vallejo,
Ángel Fragoso Chino

Edición del documento
Cintia Gabriela Reséndiz Martínez,
Mónica Jaimes Palomera,
Olivia Rivera Hernández

Diseño
Paola Guadalupe Hernández Sánchez
Montserrat Martínez Mendoza

Colaboración
Yoel Alejandro Cala Pérez
Patricia Domínguez Taylor

D.R. © 2024
Secretaría del Medio Ambiente de la CDMX
Río de la Plata No 48, 2° piso
Col. Cuauhtémoc, Alcaldía Cuauhtémoc
CP 06500

Impreso y hecho en México
Printed and made in Mexico

La mención de marcas o compañías no implica que sean validadas o recomendadas por la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. La Dirección de Monitoreo de la Calidad del Aire tomó todas las precauciones razonables para verificar la información contenida en esta publicación. La responsabilidad de la interpretación y uso de material recae en el lector. En ningún caso la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México podrá ser considerada responsable de daño alguno causado por el uso indebido del documento por parte de terceros.

Citar este documento como:
Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. 2024. **Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2022**. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire.

La información contenida en este documento es el resultado de un trabajo de equipo realizado por el personal de la Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire, quienes cada día desarrollan una labor importante con dedicación y compromiso.

Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire
Olivia Rivera Hernández

Subdirección de Análisis y Modelación
Mónica del Carmen Jaimes Palomera, Alejandro Gallardo Pérez, Cintia Gabriela Reséndiz Martínez, Ángel Fragoso Chino, Citlalli Mendoza Munguía, Eduardo Preciado Martínez, Jorge Lara Osorio, Fernanda Moreno Gillestegui, Laura Ocampo Trejo, Omar Quijada Pérez, Daniel Eusebio Quintero Vallejo, Patricia Domínguez Taylor.

Subdirección de Análisis Meteorológico
Alfredo Alfonso Soler, Milena Lemes Rosales, José Ávalos Torres.

Subdirección de Monitoreo de Calidad del Aire
Miguel Sánchez Rodríguez, Alfonso López Medina, Jorge Domínguez Ochoa, Arturo Galicia Zepeda, Ma Dolores Maya Rojas, Anabel Rivera Arenas, Gabriel Elías Castro, Abraham López Dorantes, José González Aguayo, Edson Quevedo Reyes, Ma Luisa Quintanar Chávez, Fernando Vega Quintanar, Rocío Carmona Mártir, Julio Argueta Rodríguez, Eloy Contreras Sánchez, Jesús Jiménez Valdés, Jesús Arriaga Falconi, Viviana Campos Torres, Salvador Cervantes Garduño, Donaldo Godínez Ángeles, Ernesto González Carmona, Ulises López Fabian, Adrián Pérez Narváez, Ángel Sánchez Martínez, José Juárez Mendoza, Daniel Rivera Ávila, Fernando Reyes Sandoval.

Subdirección de Sistemas y Comunicaciones
José L. del Río Jáuregui, Juan M. Arriaga Cosío, Mauricio Hernández Mote, Leyda Castro Rodríguez, Julio Martínez Alpízar, Gabriela Hernández Cruz, Gabriela Holguín Pacheco, Víctor Valdés Espinosa, Erick Consejo Valenzuela, Christian Martínez Lozano, Paola Hernández Sánchez, Montserrat Martínez Mendoza, Sergio Vargas Garduño.

Administración
Margarita Barrientos Contreras, Xóchitl Loretto Carmona, Adriana Ramírez Tecla, Francisco Serrano Vázquez, Carla Mayorga Domínguez, Samuel López Venegas, Juan Campos Díaz.

En la elaboración de este informe se contó además con la colaboración de investigadores del Centro de Ciencias de Atmósfera y el Instituto de Geofísica UNAM.

Centro de Ciencias de la Atmósfera: Análisis del depósito atmosférico: Rodolfo Sosa Echeverría, Ana Alarcón Jiménez.

ÍNDICE

RESUMEN EJECUTIVO 11
ABSTRACT 13

CAPÍTULO 1: CUMPLIMIENTO DE LA NORMATIVIDAD 16
Evolución de la normatividad en salud ambiental 18
Dióxido de azufre 22
Dióxido de nitrógeno 25
Monóxido de carbono 29
Ozono 33
Partículas PM_{10} 38
Partículas $PM_{2.5}$ 43

CAPÍTULO 2: EL TIEMPO 50
Temperatura 51
Humedad relativa 55
Precipitación 57
Viento 59
Presión atmosférica 62
Radiación solar ultravioleta 64
Índice UV 66

CAPÍTULO 3: CALIDAD DEL AIRE 70
Dióxido de azufre 75
Óxido de nitrógeno 79
Monóxido de carbono 87
Ozono 90
Partículas suspendidas (PM_{10}, $PM_{2.5}$ y $PM_{10-2.5}$) 95
Cambio climático y calidad del aire 101
Tendencia 103

CAPÍTULO 4: ÍNDICES DE CALIDAD DEL AIRE 108
Historia del Índice de calidad del aire en la Ciudad de México 109
Índice AIRE y SALUD 119
Índice de riesgo para personas susceptibles (IRPS) 125

CAPÍTULO 5: EVENTOS DE ALTA CONCENTRACIÓN 128
Cronología de las contingencias durante 2022 131
Activación Fase I O_3: 29 de marzo 134
Activación Fase I O_3: 02 de mayo 137
Activación Fase I O_3: 05 de mayo 141
Activación Fase I O_3: 20 de mayo 144
Activación Fase I O_3: 07 de junio 147
Activación Fase I O_3: 12 de noviembre 150

CAPÍTULO 6: DEPÓSITO ATMOSFÉRICO 154
Campaña 2022 155
Precipitación 156
Composición iónica 160
Depósito Atmosférico húmedo 161
pH 163

CAPÍTULO 7: MODELACIÓN 166
Evaluación del pronóstico de ozono 167
Evaluación con estadísticos discretos 170
Evaluación categórica 174
Comportamiento del pronóstico durante las contingencias atmosféricas por ozono 176
Conclusión 178

REFERENCIAS 180

ANEXOS
I. Sistema de Monitoreo Atmosférico de la CDMX 196
II Operación del SIMAT 202
II. Estaciones reubicadas 206
IV. Estadísticas básicas 210
V. Historial de contingencias ambientales 226
VI. Mosaicos de calidad del aire 230

Dedicamos este Informe en memoria:

James Lovelock, científico ambiental inglés que consideró al planeta Tierra como un organismo viviente en grave peligro, e hizo renacer los nombres de Gaia, Gea o Pachamama.

Su teoría, que fue la base para entender la acción del hombre sobre el clima, afirma que la atmósfera y la parte superficial de la Tierra, se comportan como un sistema donde la vida se encarga de autorregular las condiciones esenciales como la temperatura, composición química y salinidad. En otras palabras, dadas unas condiciones iniciales que hicieron posible el inicio de la vida en el planeta, esta vida ha modificado dichas condiciones y, por lo tanto, el resultado es consecuencia y responsabilidad de la misma vida que lo habita.

ACRONIMOS

Acrónimo/ Abreviatura	Definición
AQHI	Air Quality Health Index – Índice de calidad del aire y salud
CAMe	Comisión Ambiental de la Megalópolis
CDMX	Ciudad de México
CN/BC	Carbono negro/Black Carbon
OC	Carbono orgánico
COFEPRIS	Comisión Federal para la Protección de Riesgos Sanitarios
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
DOF	Diario Oficial de la Federación
EC	Carbono elemental equivalente al carbono negro
EDOMEX	Municipios conurbados del Estado de México dentro de la ZMCM
U. S. EPA	United States Environmental Protection Agency
HR y RH	Humedad relativa, en inglés relative humidity (RH)
IAS	Índice AIRE y SALUD
ICA	Índice de Calidad del Aire
IRPS	Índice de Riesgo para Personas Susceptibles
IUV	Índice de radiación ultravioleta
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NOM	Norma Oficial Mexicana
WMO	World Meteorological Organization
OMS	Organización Mundial de la Salud
PA	Presión atmosférica
PCAA	Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas
PP	Precipitación pluvial en mm de lluvia
PM_{co}	Partículas coarse (2.5 a 10 micras)
PPRECAA	Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas
RAMA	Red Automática de Monitoreo Atmosférico
REDDA	Red de Depósito Atmosférico
REDMA	Red Manual de Monitoreo Atmosférico
REDMET	Red de Meteorología y Radiación Solar
SACMEX	Sistema de Aguas de la Ciudad de México
SEDEMA	Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México
SIMAT	Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
SSA	Secretaría de Salud del Gobierno Federal
TMP	Temperatura
UV-A y UV-B	Radiación ultravioleta A y ultravioleta B
ZMCM	Zona Metropolitana de la Ciudad de México, 16 alcaldías CDMX y 26 municipios EDOMEX
ZMVM	Zona Metropolitana de la Ciudad de México: 16 alcaldías CDMX y 59 municipios EDOMEX

Estaciones de monitoreo

Ciudad de México	
AJU	Ajusco
AJM	Ajusco medio
BJU	Benito Juárez
CAM	Camarones
CCA	Centro de Ciencias de la Atmósfera
TEC	Cerro del Tepeyac
COR	CORENADER (Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural)
CUA	Cuajimalpa
DIC	DICONSA (Distribuidora e Impulsora Comercial CONASUPO)
EAJ	Ecoguardas Ajusco
EDL	Exconvento Desierto de los Leones
GAM	Gustavo A. Madero
HGM	Hospital General de México
IZT	Iztacalco
LAA	Laboratorio de Análisis Ambiental
IBM	Legaria
LOM	Lomas
MER	Merced
MGH	Miguel Hidalgo
MPA	Milpa Alta
MCM	Museo de la Ciudad de México
PED	Pedregal
SNT	San Nicolás Totolapan
SFE	Santa Fe
SAC	Santiago Acahualtepec
TAH	Tláhuac
UIZ	Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa
UAX	Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco
Estado de México	
ACO	Acolman
ATI	Atizapán
CHO	Chalco
CUT	Cuautitlán
FAC	Facultad de Estudios Superiores Acatlán
FAR	Facultad de Estudios Superiores Aragón
INN	Instituto de Investigaciones Nucleares
LPR	La Presa
LLA	Los Laureles
MON	Montecillo
NEZ	Nezahualcóyotl
SAG	San Agustín
TLA	Tlalnepantla
TLI	Tultitlán
VIF	Villa de las Flores
XAL	Xalostoc

RESUMEN EJECUTIVO

En 2022 inició la aplicación de los nuevos niveles de normatividad nacional para evaluar la calidad del aire y en cada actualización los límites se han hecho más estrictos con la finalidad de prevenir efectos adversos en la salud, así como implementar estrategias para la reducción de emisiones. Cuando se reducen los límites normados, es común que se superen con mayor frecuencia, aunque los niveles de contaminación se hayan mantenido o disminuido. Con las actualizaciones de las NOM, el monóxido de carbono (CO) fue el único contaminante que cumplió con sus límites; por el contrario, el dióxido de nitrógeno (NO_2) registró niveles con los que ya superó los umbrales actualizados. El dióxido de azufre (SO_2), cumplió con los límites en las estaciones situadas en la CDMX, pero en EDOMEX no, debido a la cercanía con las principales fuentes del contaminante. En cuanto a ozono (O_3), se incumplió la NOM en ambos límites (promedio horario y móvil de 8 h), el indicador horario registró 890 horas con concentraciones superiores a 90 ppb y alcanzó un máximo de 170 ppb (observado durante una contingencia). Las partículas también superaron los umbrales establecidos en su NOM, $PM_{2.5}$ registró máximos de 42 $\mu g/m^3$ (promedio de 24 h) y 20 $\mu g/m^3$ (promedio anual), mientras que PM_{10} obtuvo valores de 100 $\mu g/m^3$ (promedio de 24 h) y 80 $\mu g/m^3$ (promedio anual)

En el comportamiento de variables meteorológicas monitoreadas por el SIMAT, se registró un promedio anual de temperatura de 16.9 °C, con mayo como el mes más cálido con 20.2 °C y el más frío fue diciembre con 13.5 °C. En términos de humedad relativa, el promedio anual fue 53.2 % con agosto y septiembre que presentaron los máximos mensuales, ambos con 65 %, por el contrario, marzo fue el mes más seco con 36 %. El comportamiento de la velocidad del viento tuvo una media anual de 2.1 m/s; con los valores más altos en septiembre (2.5 m/s) y los mínimos en diciembre (1.74 m/s). La presión atmosférica anual fue 584.7 mmHg con el máximo mensual en julio y el mínimo en abril. La lluvia acumulada medida por el sistema de Aguas de la CDMX (SACMEX), reportó el valor mensual más alto en julio con 131.8 mm y febrero registró el mínimo con 2.2 mm.

La calidad del aire se analiza respecto a la concentración de contaminantes criterio, para esto se utilizaron las estaciones de monitoreo continuo que tuvieron el 70 % de suficiencia anual de datos. El promedio anual de SO_2 fue de 2.6 ppb, lo que representó una reducción del 10 % respecto al año anterior. En los óxidos de nitrógeno (NOx), los promedios anuales fueron 34 ppb para NOx, 12 ppb para NO y 22 ppb para NO_2, con los valores más altos durante enero y diciembre. En los datos de ozono, se observó una media anual de 30.7 ppb, esto representó un 5 % de incremento con respecto a 2021; en el comportamiento mensual, mayo registró las concentraciones más altas de O_3. En las PM_{10} y $PM_{2.5}$, sus promedios anuales fueron 39 $\mu g/m^3$ y 19 $\mu g/m^3$, respectivamente; con los valores más altos durante marzo y diciembre. Los máximos de partículas en el promedio de 24 horas fueron 207 $\mu g/m^3$ para PM_{10} y 85 $\mu g/m^3$ en $PM_{2.5}$.

En este informe se realizó una cronología sobre la historia y evolución del índice de calidad del aire en

la CDMX, con las actualizaciones más importantes desde 1982 hasta la fecha, por lo que se presenta la primera implementación del índice, así como sus ajustes con respecto a los cambios de las NOM. El primer índice fue el Índice Mexicano de Calidad del Aire (IMEXCA), establecido el 29 de noviembre de 1982 e incluye cinco categorías contaminantes. Posteriormente, se publicó el Índice Mexicano de Calidad del Aire (IMECA), basado en los primeros límites NOM. El IMECA se actualizó en 2006, con la publicación de la norma NADF-009-AIRE-2005, en la que se presentan algoritmos e intervalos de concentración que tienen asignadas categorías de calidad del aire divididas por colores, esto para facilitar la comprensión de los niveles de contaminación. En octubre de 2014, se actualizaron las NOM de ozono y partículas, por lo que se modificaron los intervalos del IMECA. Algunas entidades del país tenían un índice de calidad del aire; sin embargo, no estaban homologados, por lo que a finales del 2019 se publicó la NOM-172-SEMARNAT-2019, en la que se establecen los lineamientos del Índice AIRE y SALUD (IAS), esta norma tiene aplicación a nivel nacional; el IAS tiene diferencias con el Índice de calidad del Aire de la CDMX, entre las cuales destaca el indicador promedio móvil de 12 horas (NowCast) para las partículas y el IAS combinado para ozono. Existe otro tipo de índice relacionado con salud, el Índice de Riesgo para Personas Susceptibles (IRPS) publicado a finales del 2018, que tiene la característica de ser multicontaminante ya que considera la concentración de O_3, $PM_{2.5}$ y NO_2; el IRPS tiene la finalidad de mejorar la información sobre los efectos de la contaminación en la salud de la población más vulnerable, como las personas con enfermedades respiratorias o cardiacas.

Durante 2022 se presentaron seis contingencias causadas por ozono (O_3). La primera a finales de marzo duró dos días y alcanzó 162 ppb. El segundo episodio fue del 2 al 4 de mayo y con máximos de 169 ppb. La tercera contingencia se presentó del 5 al 6 de mayo y alcanzó 168 ppb en el promedio horario. El cuarto episodio ocurrió del 20 al 21 de mayo, en el cual se presentaron los valores más altos del contaminante, con 172 ppb. La quinta y última contingencia dentro de la temporada de ozono (15 de febrero al 15 de junio) se registró del 7 al 8 de junio con máximos de 156 ppb. Finalmente, el sexto evento ocurrió fuera de temporada de ozono, del 12 al 14 de noviembre y alcanzó valores de 155 ppb.

La Red de Depósito Atmosférico (REDDA) operó con 13 sitios durante 2022, esto debido a que después de la pandemia todavía no se han restablecido operaciones en el resto de las estaciones (SNT, IBM y DIC). La lluvia acumulada registrada de mayo a octubre en las estaciones de la REDDA fue a 547 mm, con los máximos en los sitios del suroeste, lo cual fue congruente con el patrón de los años pasados y de la dirección del viento. En términos de lluvia ácida (pH < 5.6), en el 9.3 % de las muestras analizadas se determinó que corresponden a lluvia ácida y agosto fue el mes con mayor cantidad de muestras ácidas. La composición iónica de la lluvia tuvo predominio de los iones amonio, calcio, sulfatos y nitratos; mientras que en el depósito atmosférico húmedo tuvo mayor contribución de nitratos y sulfatos.

ABSTRACT

In 2022, new national health legislation related to air pollution came into effect in Mexico City to protect public health. These new standards have made air pollution limits stricter. As a result, several days in 2022 were reported with concentrations exceeding the standard limits for most air pollutants, even though overall concentrations had been maintained or reduced. In 2022, carbon monoxide (CO) was the only pollutant consistently below the new standard limit. Nitrogen dioxide (NO_2) concentrations exceeded the new legislative limits on several days, while sulfur dioxide (SO_2) levels were below the limit at Mexico City stations but exceeded it at State of Mexico stations due to their proximity to emission sources of this compound. Ozone (O_3) concentrations consistently surpassed the limits for both 1-hour average and 8-hour NowCast reports. The 1-hour average was exceeded for 890 hours during 2022, with concentrations surpassing the 90 ppb limit; the maximum recorded concentration was 170 ppb during a contingency episode. Particulate matter (PM) exhibited similar behavior to ozone, with recorded concentrations also exceeding standard limits. $PM_{2.5}$ had a 24-hour average concentration of 42 $\mu g/m^3$ and an annual average of 20 $\mu g/m^3$, while PM_{10} had a 24-hour average of 100 $\mu g/m^3$ and an annual average of 80 $\mu g/m^3$.

Meteorological variables measured by the REDMA network in SIMAT were as follows: an average temperature of 16.9°C, with May being the warmest month at 20.2°C and December the coldest at 13.5°C. The average relative humidity was 53.2%, with the highest percentage reaching 65% in August and September, and the driest month being March with 36%. The average wind speed in the Metropolitan Area was 2.1 m/s, with the highest value of 2.5 m/s in September and the lowest of 1.74 m/s in December. The average pressure was 584.7 mm Hg, peaking in July and reaching a minimum in April. Cumulative rainfall, measured by the Water System from Mexico City (SACMEX), had a highest value of 131.8 mm in July and the lowest of 2.2 mm in February.

The report on criteria pollutants from the automatic monitoring network was based on stations that provided at least 70% of the data during the year. Sulfur dioxide (SO_2) had an average concentration reduction of 10% compared to the previous year, with a value of 2.6 ppb. Average concentrations for nitrogen oxides (NOx) were 34 ppb for NOx, 12 ppb for NO, and 22 ppb for NO_2, with the highest values recorded in January and December. Ozone (O_3) data showed a 5% increase from 2021, with an annual average of 30.7 ppb; May had the highest concentrations due to it being the warmest month of the year. The annual average concentrations for particles were 39 $\mu g/m^3$ for PM_{10} and 19 $\mu g/m^3$ for $PM_{2.5}$, with the highest values recorded in March and December. The maximum 24-hour average concentrations were 207 $\mu g/m^3$ for PM_{10} and 85 $\mu g/m^3$ for $PM_{2.5}$.

This report includes a special chapter on the historical chronology and evolution of the Air Quality Index in Mexico. The first Mexican index, published on November 29, 1982, was called

IMEXCA and was similar to the Air Pollution Index from the United States. The index was later updated and renamed IMECA (Air Quality Metropolitan Index) with the introduction of the first health standards. IMECA was revised in 2006 under the Mexico City technical standard NADF-009-AIRE-2005, which included algorithms for each concentration range, represented by different colors. In October 2014, national health standards for ozone and particles were updated, leading to modifications in IMECA's algorithms for the new ranges.

In 2018, a new index was introduced in Mexico City, known as the Exposure Risk Index for Susceptible People (IRPS). This multi-pollutant index provides information to sensitive groups (e.g., children or individuals with cardiovascular diseases) about continuous exposure to a mix of pollutants: ozone, PM2.5, and nitrogen oxides, considering health effects.

In 2019, the air quality index was standardized across the country and published in a National Standard: NOM-172-SEMARNAT-2019. The index was renamed the Air and Health Index (IAS). This new standard includes a 12-hour average index for PM2.5 and PM10 particles (NowCast) and has a combined IAS index for ozone.

There were six contingencies reported in 2022 caused by ozone (O3). The first occurred at the end of March over two days, reaching 162 ppb. The second was from May 2nd to 4th, with a maximum of 169 ppb. The third was from May 5th to 6th, reaching a concentration of 168 ppb for the 1-hour average. The fourth occurred from May 20th to 21st, presenting the highest values at 172 ppb. The fifth was from June 7th to 8th with 156 ppb, and the last one was from November 12th to 14th, reaching 155 ppb.

The atmospheric deposition network (REDDA) had 13 sites in 2022. Some stations needed to be restored after the pandemic. Cumulative rainfall recorded was 547 mm, with the maximum located in the southeastern stations of the city. Acid rain with a pH of <5.6 was present in 9.3% of the samples; August was the month with the highest number of acid rain samples. The ionic composition of the rain included ammonium, calcium, sulfates, and nitrates, while both washout and rainout samples contained a higher contribution of sulfates and nitrates.

CAPÍTULO 1

Cumplimiento de la normatividad

Normas Oficiales Mexicanas de salud ambiental

Las normas o estándares de calidad del aire son una herramienta que los gobiernos usan para vigilar y evaluar los niveles de contaminantes atmosféricos. El objetivo de estas normas es proteger a la población de los riesgos que los contaminantes representan para la salud humana, por lo tanto, las normas definen los límites permisibles para diferentes tiempos de exposición, a corto y largo plazo, esto debido a que los riesgos para la salud dependen de la concentración y del tiempo de exposición.

Las normas oficiales mexicanas (NOM) de salud ambiental indican los valores límites permisibles de los contaminantes criterio[1] aplicables en México y fueron establecidas para evaluar la concentración máxima de la contaminación en las ciudades y zonas metropolitanas del país. Los límites máximos permisibles establecidos en las NOM están basados en estudios epidemiológicos y conforme a la nueva evidencia que estos proporcionan, los límites se han modificado y reducido, para evitar un riesgo mayor a la salud, así como de otras consecuencias en morbilidad y mortalidad que provoca la exposición a los contaminantes.

La actualización de las NOM de salud ambiental son responsabilidad de la Secretaría de Salud (SSA), la cual gestiona las propuestas de un grupo de trabajo, conformado por varias instituciones gubernamentales y académicas, organizaciones sin fines de lucro y del sector privado. En las actualizaciones de los límites, se considera la evidencia existente sobre el efecto de los contaminantes, las guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS), así como el contexto del país, en términos de infraestructura de monitoreo, cumplimiento factible de los límites de acuerdo con la realidad del país, etc.

A finales del 2021, se actualizaron las NOM de ozono (O_3), partículas (PM_{10} y $PM_{2.5}$), dióxido de nitrógeno (NO_2) y monóxido de carbono (CO), las cuales entraron en vigor en diciembre 2021; sin embargo, debido a que las NOM se evalúan de manera anual, estos nuevos límites se utilizaron el análisis de la concentración máxima de los contaminantes durante 2022. En este capítulo se presenta la evolución de las NOM, así como su evaluación en 2022 con los límites actualizados.

[1] Los contaminantes criterio son: dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2), monóxido de carbono (CO), ozono (O_3), Plomo (Pb), Partículas menores a 10 y 2.5 micrómetros (PM_{10} y $PM_{2.5}$). Son **contaminantes criterio** debido a que causan efectos negativos en la salud y tienen un valor límite establecido en alguna norma.

Evolución de la normatividad en salud ambiental

En 1993 se establecieron las primeras normas de salud ambiental en México para todos los contaminantes criterio, los valores límite en estas normas se basaron en la evidencia existente en el momento; sin embargo, los avances en los estudios epidemiológicos han documentado nuevos datos, por lo que ha sido necesario modificar las NOM.

La evolución y los cambios de cada NOM ha sido diferentes a través del tiempo, en la **Figura 1.1** se presenta la cronología general de las modificaciones y en la **Tabla 1.1** contiene el detalle de la reducción de los valores límite en cada año y contaminante. Es importante señalar que las actuales normas de ozono (NOM-020-SSA1-2021) y partículas (NOM-025-SSA1-2021) consideran un **cambio gradual** hacia las guías OMS en su actualización del 2005 (OMS, 2006), por lo que para el 2026 se aplicarán estos valores guía.

En la comparación de los límites de las primeras NOM con su última actualización (**Tabla 1.1**), se puede observar que los valores presentaron una reducción considerable. En los indicadores de ozono, la disminución fue del **18** y **19 %** para los promedios de 1 h y móvil de 8 h, respectivamente. En CO fue del **18 %** para el móvil de 8 h y en su última actualización se agregó un nuevo indicador de 1 h, el cual no estaba contemplado en la primera NOM de este contaminante.

En el caso de SO_2, se observaron varios cambios en las métricas evaluadas, inicialmente en 1993 se calculaba un promedio de 24 h y un promedio anual, en 2010 se agregó el promedio móvil de 8 h y finalmente, en la actualización del 2019 se eliminó el indicador de 8 h y la media anual, por lo que solamente permaneció el promedio de 24 h, el valor de esta métrica se redujo un **69%** en comparación con su límite inicial, y además, se agregó el promedio 1 h; sin embargo, ambos indicadores se evalúan de manera trianual y con varias condiciones de suficiencia, los detalles se pueden consultar en la NOM de SO_2 y en el Informe Anual 2020 (SEDEMA, 2023a).

Para NO_2, el límite del promedio horario disminuyó en un **50 %**, de 210 a 106 ppb (valor OMS 2005, a 25°C y 1 atm). En el caso de las partículas, la NOM de 1993 inicialmente sólo consideraba PM_{10}, con un límite de 150 µg/m^3 para el valor diario y 50 µg/m^3 para el anual; en 2005 se modificó la NOM para agregar $PM_{2.5}$, con un límite diario de 65 µg/m^3 y su métrica anual se estableció en 15 µg/m^3, si se comparan estos valores con la última actualización de 2021, la reducción fue del **53 %** y **28 %** para el indicador diario y anual de PM_{10}, respectivamente, mientras que para $PM_{2.5}$ fue una disminución del **37 %** (promedio 24 h) y del **33 %** (media anual).

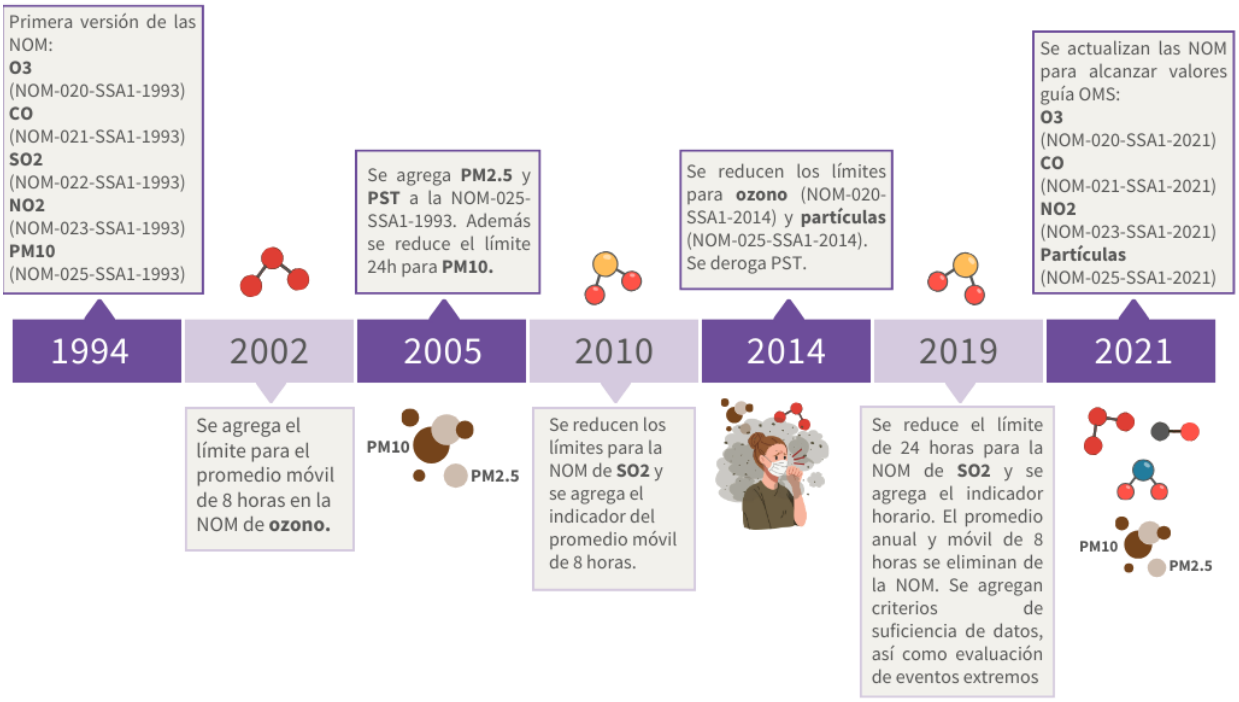


Figura 1.1. Cronología general de los cambios más importantes en la normatividad de salud ambiental.

Tabla 1.1. Modificaciones en los límites de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de Salud Ambiental.

Contaminante	Indicador	Año de la NOM									Última actualización vs. 1993
		1993	2002	2005	2010	2014	2019	2021	2024	2026	
O_3	1h	110				95		90	90		-18 %
(ppb)	8h		80			70		65	60	51	-19%
CO	1h							26			
(ppm)	8h	11						9			-18 %
SO_2 (ppb)	1h						75				
	8h				200						
	24h	130			110		40				-69 %
	Anual	30			25						
NO_2	1h	210						106			-50 %
(ppb)	Anual							21			
PM_{10}	24h	150		120		75		70	60	50	-53 %
($\mu g/m^3$)	Anual	50		50		40		36	28	20	-28 %
$PM_{2.5}$	24h			65		45		41	33	25	-37 %
($\mu g/m^3$)	Anual			15		12		10	10		-33 %

Nota: los límites dentro de los recuadros morado claro son los que se usaron en este capítulo

En cada actualización, los límites normados se han hecho más estrictos, con esto se tiene el compromiso de diseñar nuevas y mejores políticas ambientales que reduzcan la emisión de contaminantes primarios, así como de precursores de los secundarios y, en consecuencia, que la concentración de los contaminantes criterio también disminuya. Es importante mencionar que los niveles de contaminación en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) se han reducido en los últimos 30 años; sin embargo, al disminuir los límites normados de los contaminantes, puede ocurrir que se superen los valores más estrictos, aunque la contaminación no haya aumentado, como es el caso de NO_2, el cual cumplió con la norma anterior; pero en esta actualización de la NOM ya supera los nuevos límites. En la **Tabla 1.2** se presentan las especificaciones de las NOM actualizadas en 2021 y vigentes en 2022, con las cuales fue evaluada la concentración máxima de los contaminantes criterio durante este año.

Tabla 1.2. Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de Salud Ambiental vigentes en **2022**.

Contaminante	NOM vigente	Especificaciones		Fecha actualización
Ozono (O_3)	NOM-020-SSA1-2021	**90 ppb** **65 ppb**	Promedio de 1 h Promedio móvil de 8 h	28/Octubre/2021
Monóxido de carbono (CO)	NOM-021-SSA1-2021	**9 ppm** **26 ppm**	Promedio móvil de 8 h Promedio de 1 h	29/Octubre/2021
Dióxido de azufre (SO_2)	NOM-022-SSA1-2019	**75 ppb** **40 ppb**	Promedio trianual del percentil 99 (P99) del máximo de 1 h Máximo trianual del promedio de 24 h	20/Agosto/2019
Dióxido de nitrógeno (NO_2)	NOM-023-SSA1-2021	**106 ppb** **21 ppb**	Promedio de 1 h Promedio anual	27/Octubre/2021
Partículas menores a 10 micrómetros (PM_{10})	NOM-025-SSA1-2021	**70 µg/m³** **36 µg/m³**	Promedio de 24 h Promedio anual	27/Octubre/2021
Partículas menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$)		**41 µg/m³** **10 µg/m³**	Promedio de 24 h Promedio anual	

En las siguientes secciones, se describe la evaluación de los valores máximos que se registraron durante el 2022 en la ZMCM con respecto a la NOM vigente de cada contaminante, así como la comparación con las guías de la Organización Mundial de la Salud (OMS) del año 2021 y los estándares de calidad del aire de la U.S. EPA (NAAQS - *National Ambient Air Quality Standards*). Es importante mencionar que para la comparación con las guías OMS se hace una conversión de los valores de ppb a $\mu g/m^3$ y viceversa, en condiciones de la ZMCM de 17°C y 585 mmHg de presión.

En la **Tabla 1.3**, se presenta el resumen de cumplimiento dividido por entidad para el año 2022 para los límites de la NOM, las guías OMS y NAAQS establecidos por la Agencia de protección Ambiental de Estados Unidos (U.S. EPA, por sus siglas en inglés). Se puede observar que CO fue el único contaminante que cumplió la NOM, OMS y U.S. EPA, tanto en CDMX como EDOMEX. Para el resto de los contaminantes se tiene un comportamiento variable, la concentración de SO_2 cumplió con su NOM, OMS y con la NAAQS de la U.S. EPA en CDMX, pero no en el EDOMEX; para el NO_2 y las PM_{10}, rebasaron todos los límites excepto el de la U.S. EPA, en el cual, ambas entidades cumplieron con el respectivo estándar. Finalmente, los valores de ozono y $PM_{2.5}$ durante 2022, superaron todos los estándares nacionales e internacionales.

Tabla 1.3. Resumen del cumplimiento de las NOM, guías OMS y estándares de la U.S. EPA por entidad de la ZMCM y contaminante.

Contaminante	NOM		OMS		U.S. EPA	
	CDMX	EDOMEX	CDMX	EDOMEX	CDMX	EDOMEX
SO_2	✓	✗	✓	✗	✓	✗
NO_2	✗	✗	✗	✗	✓	✓
CO	✓	✓	✓	✓	✓	✓
O_3	✗	✗	✗	✗	✗	✗
PM_{10}	✗	✗	✗	✗	✓	✓
$PM_{2.5}$	✗	✗	✗	✗	✗	✗

DIÓXIDO DE AZUFRE (SO_2)

El SO_2 es un contaminante gaseoso que proviene de fuentes antropogénicas por el uso y quema de combustibles fósiles. En la ZMCM, las fuentes fijas aportan el 40 % del SO_2 total, donde la mayor emisión corresponde a la fabricación de productos a base de minerales no metálicos, industrias del papel y metalurgia. Las fuentes de área contribuyen con el 32 % (p. ej. combustión habitacional, quemas a cielo abierto, etc.), seguido de fuentes móviles con un 29 % donde la mayor emisión es de los autos particulares, taxis y tractocamiones (SEDEMA, 2023b).

Este contaminante tiene diversos efectos negativos en el ambiente, ya que cuando se mezcla con el agua en la atmósfera produce lluvia ácida, lo cual puede dañar la vegetación e infraestructura urbana; en el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT), la Red de Depósito Atmosférico (REDDA) permite analizar este fenómeno, así como la composición de la lluvia en la ZMCM, lo cual se puede consultar en el **capítulo 6** de este informe anual. La vegetación es afectada por el SO_2, no sólo por medio de la lluvia ácida sino por la exposición al contaminante, ya que existe evidencia de que altas concentraciones de SO_2 pueden interrumpir el metabolismo celular de las plantas, causar daño en cloroplastos, destrucción de la clorofila y, en consecuencia, disminución de la fotosíntesis (Legge et al., 1998; Dhir, 2016).

En términos de salud, la exposición a corto plazo al SO_2 causa efectos negativos en el sistema respiratorio, puede incrementar el riesgo de mortalidad general y respiratoria (Orellano et al., 2021), también se ha encontrado evidencia de consecuencias en el sistema cardiovascular, con asociaciones significativas con el aumento de admisiones hospitalarias de accidentes cerebrovasculares (Shen et al., 2020). La exposición prolongada a niveles altos aumenta los síntomas respiratorios y reduce la capacidad de funcionamiento de los pulmones. Los principales síntomas causados por la exposición al SO_2 son sibilancias, dificultad para respirar y opresión en el pecho (*American Lung Association*, 2024a).

Evaluación de la Norma

En México, la concentración de SO_2 se evalúa con la NOM-022-SSA1-2019 mediante dos indicadores, uno horario y otro diario. La última actualización de la NOM de SO_2 ocurrió en 2019, en la que se definieron nuevos límites y métodos de cálculo para evaluar la concentración máxima de SO_2, los cuales se pueden consultar directamente en la NOM-022-SSA1-2019 y en una breve descripción incluida en el Informe Anual de calidad del aire del 2020 (SEDEMA, 2023a).

Durante 2022, de las 31 estaciones que monitorean SO_2 en toda la ZMCM, solamente 13 sitios cumplieron con los criterios de suficiencia de datos estipulados en la NOM-022-SSA1-2019; sin embargo, la información completa de todas las estaciones se puede consultar en el **Anexo IV** de este informe anual.

Los valores máximos de los indicadores de la NOM en la ZMCM para 2022 se presentan en la **Tabla 1.4**, donde se observa que, de manera general, la zona metropolitana completa no cumplió con los límites normados, ya que obtuvo un máximo de 89 ppb en el indicador horario y 43 ppb en la métrica diaria. Estos valores corresponden a las estaciones ubicadas al norte de la CDMX, en el Estado de México (EDOMEX), donde se presentan los máximos del contaminante, esto ocurre debido a la cercanía con el complejo industrial de Tula, en Hidalgo, que es una de las principales fuentes del contaminante y su emisión se puede trasladar hacia la ZMCM debido a la trayectoria predominante del viento (norte a sur). Para los sitios dentro de la Ciudad de México (CDMX), los límites normados sí se cumplieron, con un máximo de 55 ppb y 29 ppb para el indicador horario y diario, respectivamente.

En la comparación con los límites internacionales (OMS y U.S. EPA) se mantiene el mismo comportamiento, con los valores más altos en EDOMEX y solamente la CDMX cumplió con todos los umbrales. En el indicador diario de la OMS, EDOMEX superó la guía con un valor de 75 µg/m^3 (equivalente a 36 ppb, 17.5 °C, 585 mmHg); mientras que la CDMX registró un máximo de 37 µg/m^3 (18 ppb, 17 °C, 585 mmHg), el cual es inferior a la guía OMS. Para la métrica horaria de la U.S. EPA se presentaron los mismos valores que la NOM y también se excedió dicho estándar en EDOMEX (89 ppb) pero no en la CDMX, ya que su máximo fue 55 ppb.

A nivel estación (**Figura 1.2**), en el indicador promedio trianual del percentil 99 (P99) de 1h, usado en la NOM y U.S. EPA, los máximos se presentaron en los sitios Tlalnepantla (TLA) con 89 ppb para el EDOMEX y en Merced (MER) con 55 ppb para la CDMX. Los mínimos de este indicador se registraron en la estación UAM Xochimilco (UAX) con 30 ppb para la CDMX y en el sitio Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (INN) con 17 ppb para el EDOMEX. La métrica del máximo trianual del promedio 24 h (NOM) presentó el mismo patrón, con los máximos en las estaciones TLA (43 ppb) y Camarones (CAM) con 33 ppb; mientras que los mínimos fueron en UAX e INN con valores de 16 y 7 ppb, respectivamente.

Para el indicador de 24 horas de la OMS, el valor más alto se registró en la estación Villa de las Flores (VIF) con 36 ppb (equivalente a 75 µg/m^3) para el EDOMEX y en la CDMX fue en CAM con 18 ppb (37 µg/m^3). Los mínimos de este indicador fueron en las estaciones Tláhuac (TAH) e INN, ambas con 5 ppb (10 µg/m^3).

Tabla 1.4. Valores de concentración máxima de SO_2 con respecto a los indicadores y límites de la NOM-022-SSA1-2019, OMS y las NAAQS de la U.S. EPA.

Entidad	NOM		OMS	U.S. EPA
	Promedio trianual del P99 máx. 1 h	Máximo trianual del promedio 24 h	P99 del promedio 24 h	Promedio trianual del P99 máx. 1 h
	75 ppb	40 ppb	40 µg/m³	75 ppb
ZMCM	89 ppb	43 ppb	75 µg/m³	89 ppb
CDMX	55 ppb	33 ppb	37 µg/m³	55 ppb
EDOMEX	89 ppb	43 ppb	75 µg/m³	89 ppb

Notas:
Se resaltan en **rojo** los valores que rebasan los límites.
Los datos en la columna **OMS** fueron convertidos a µg/m³ con una temperatura de 17°C y 585 mmHg de presión.
La **U.S. EPA** se refiere a la institución internacional que establece estándares (NAAQS) en Estados Unidos de América.

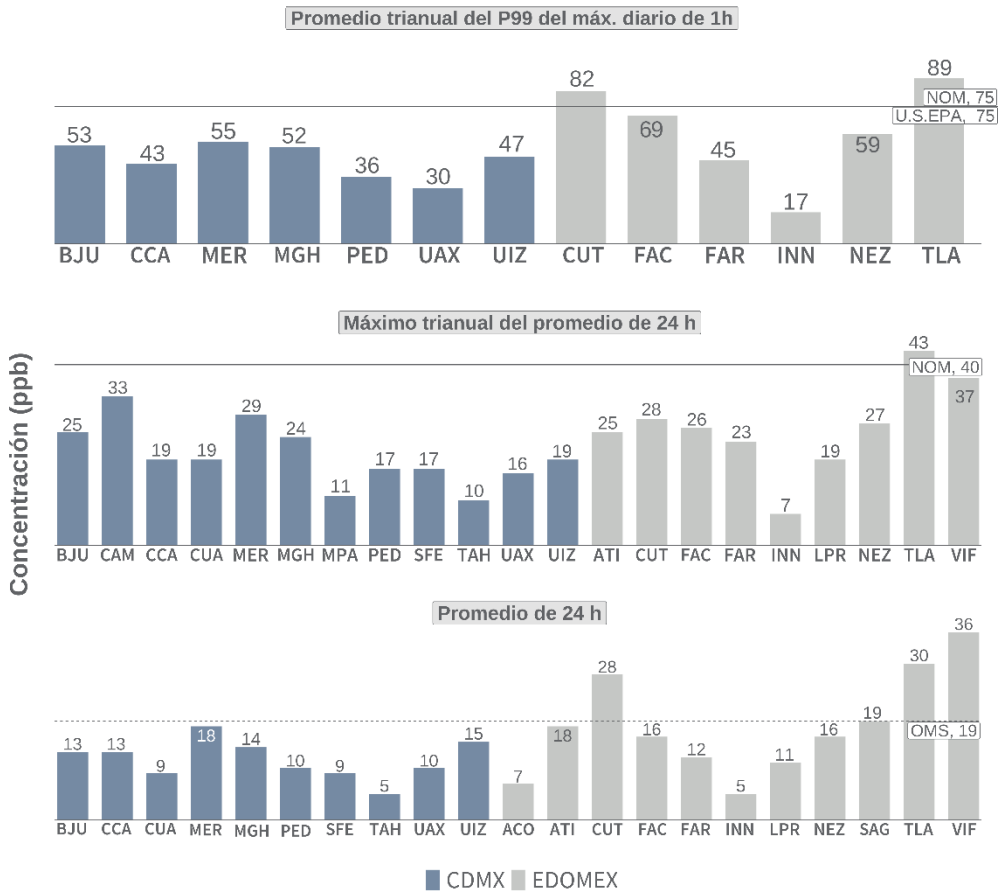


Figura 1.2. Concentración máxima de SO_2 con respecto a los indicadores y límites de la NOM-022-SSA1-2019, OMS (convertido a ppb con 17°C, 585 mmHg) y NAAQS de la U.S. EPA, por estación de monitoreo.

DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO_2)

El dióxido de nitrógeno (NO_2) pertenece a un grupo de gases altamente reactivos conocidos como óxidos de nitrógeno (NOx). Los NOx se generan debido al uso de combustibles fósiles en automóviles, centrales eléctricas e industrias. En la ZMCM, las fuentes móviles contribuyen con el 84 % del total de los NOx, con el principal aporte de los autos particulares, camionetas SUV y taxis (SEDEMA, 2023b).

En los efectos negativos al ambiente, el NO_2 también es precursor de la lluvia ácida, al igual que el SO_2, lo cual daña ecosistemas sensibles como lagos y bosques. En la vegetación, la exposición a niveles superiores a 100 ppb reduce la conductancia estomática en las plantas y las condiciones ácidas producidas por el NO_2 influyen en el proceso de flujo de electrones; adicionalmente, si existen mezclas de contaminantes como O_3-NO_2, SO_2-O_3 y SO_2-NO_2. se producen efectos sinérgicos y por lo tanto causan graves daños a la fotosíntesis (Dhir, 2016).

En términos de salud, existe amplia evidencia de los efectos del NO_2, especialmente al sistema respiratorio ya que causa síntomas como dificultad para respirar, exacerbación del asma, tos y sibilancias. En el corto plazo, la evidencia de estudios epidemiológicos muestra asociaciones significativas entre la exposición al NO_2 con el aumento de visitas hospitalarias por enfermedades respiratorias, así como riesgo de mortalidad cardiovascular y respiratoria (Wang et al., 2022). En los efectos a largo plazo, el NO_2 también se ha relacionado con mortalidad respiratoria y cardiovascular (Chen et al., 2024; Huang et al., 2021), además existe evidencia que la exposición prolongada a concentraciones elevadas de NO_2 pueden contribuir al desarrollo de asma y potencialmente aumentar la susceptibilidad a infecciones respiratorias (U.S. EPA, 2024a).

Evaluación de la Norma

En México, el NO_2 está regulado con la **NOM-023-SSA1-2021**, recién actualizada en octubre del 2021 y entró en vigor en diciembre de ese mismo año. La primera versión de esta NOM fue publicada en diciembre de 1994 (NOM-023-SSA1-1993) en el Diario Oficial de la Federación (DOF) y solamente establecía un valor límite horario de 210 ppb, el cual no debía ser rebasado en más de una hora al año. En la ZMCM, se cumplió con este límite normado durante 15 años consecutivos, desde 2006 hasta 2021, el cual fue el último en ser evaluado con dicho umbral.

En la actualización de la NOM del 2021, se adoptaron los valores guía OMS del 2005 correspondientes a 200 $\mu g/m^3$ (equivalentes a 106 ppb; 25 °C, 1 atm) para el indicador horario y 40 $\mu g/m^3$ (21 ppb; 25 °C 1 atm) para la métrica anual (OMS, 2006). En **Figura 1.3** se presenta el cambio en la NOM de NO_2, se observa cómo el indicador horario disminuyó su valor a la mitad y se agregó el nuevo indicador anual, que no se consideraba en la versión anterior.

Es importante mencionar que en la actualización de la NOM no se consideraron las nuevas guías OMS del 2021, en las cuales el indicador anual se redujo 4 veces su valor (de 40 a 10 µg/m^3), además que se agregó un promedio diario en 25 µg/m^3 (equivalentes a 13 ppb).

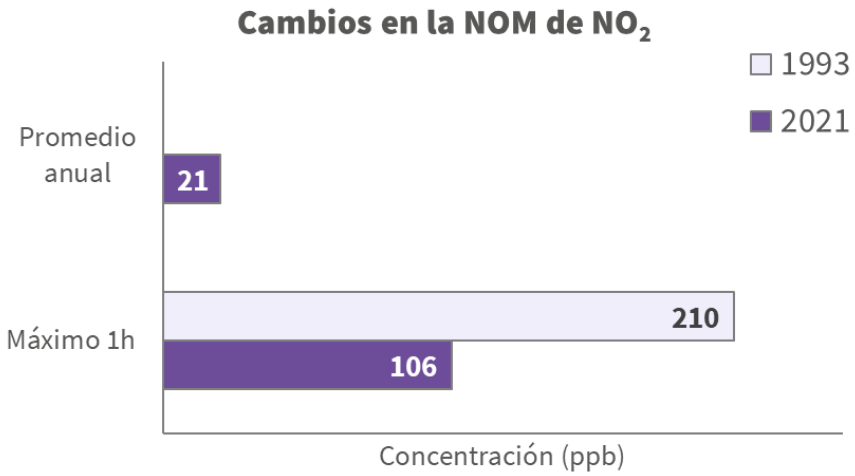


Figura 1.3. Cambios en los límites de la NOM-023-SSA1-**1993** y NOM-023-SSA1-**2021** correspondiente a NO_2

En un análisis del máximo horario de NO_2 desde 1994 al 2022 (**Figura 1.4**), se puede observar la reducción en la concentración de este contaminante, ya que de 1994 a 2005 se alcanzaron valores máximos superiores a 200 ppb, incluso se registraron máximos superiores a 400 ppb. Este cambio en los niveles de NO_2 ocurrió debido a las políticas ambientales implementadas en la ZMCM, especialmente en las fuentes móviles, las cuales tienen la principal contribución a este contaminante. En 2022, con el nuevo límite de la NOM-023-SSA1-2021, la concentración máxima de NO_2 ya no cumple con las especificaciones normadas.

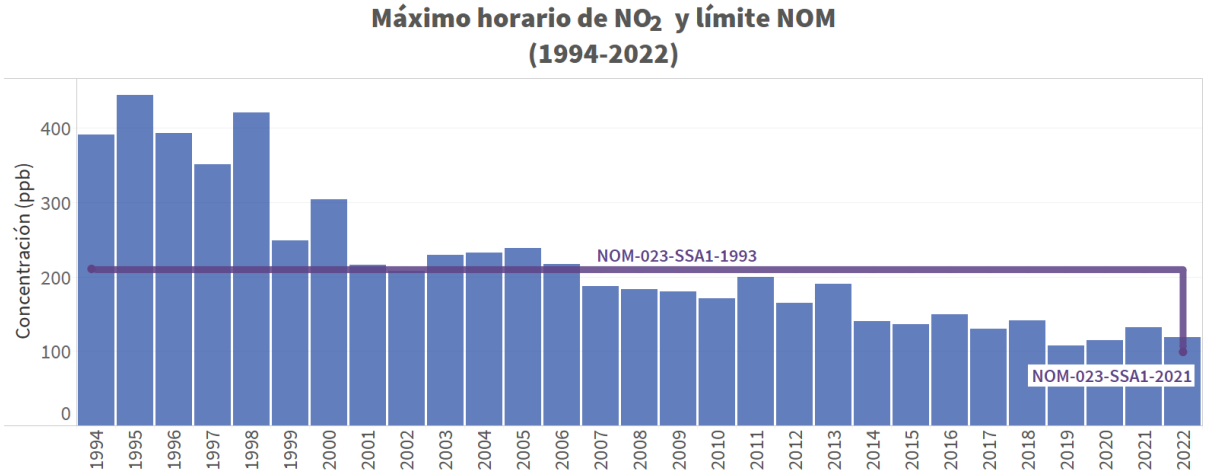


Figura 1.4. Concentración máxima horaria de NO_2 (1994-2022) con respecto a los límites de la NOM-023-SSA1-1993 y NOM-023-SSA1-2021.

En la **Tabla 1.5** se presenta la evaluación de los valores máximos registrados en 2022 para ZMCM y en cada entidad que la conforma, se observó que la nueva NOM de NO_2 ya no se cumple en la ZMCM. El máximo del indicador horario fue 119 ppb, registrado en EDOMEX; mientras que para la CDMX fue 112 ppb. En el caso del promedio anual, ambas entidades superaron la NOM con 30 y 28 ppb en CDMX y EDOMEX, respectivamente.

En los estándares internacionales, se cumplió con el indicador horario de las guías OMS 2021; sin embargo, los límites de las métricas diaria y anual fueron superados. En CDMX el máximo del indicador diario fue 76 µg/m^3 (equivalente a 51 ppb, 17 °C, 585 mmHg) y en EDOMEX fue 73 µg/m^3 (49 ppb), mientras que, para el promedio anual, los máximos fueron 45 µg/m^3 (30 ppb) en CDMX y 42 µg/m^3 (28 ppb) en EDOMEX.

Para las NAAQS de la U.S. EPA, ambos límites se cumplieron; en el indicador del promedio trianual del percentil 98 (P98) de 1 hora se registró un máximo de 66 ppb en el EDOMEX y 64 ppb en CDMX. En el promedio anual, se presentaron los mismos valores que la NOM, pero en la U.S. EPA el límite establecido para este indicador es mayor (53 ppb) y no fue superado en la ZMCM.

En el análisis por estación de monitoreo (**Figura 1.5**), los máximos horarios (NOM y OMS) se presentaron en Benito Juárez (BJU) con 112 ppb (equivalentes a 167 µg/m^3; 17 °C, 585 mmHg) para la CDMX y Cuautitlán (CUT) con 119 ppb (177 µg/m^3) en EDOMEX. Los mínimos del indicador horario fueron en TAH con 59 ppb (88 µg/m^3) en la CDMX y 52 ppb (77 µg/m^3) en Montecillos (MON) en el EDOMEX. Para el promedio anual, indicador usado en la NOM, OMS y U.S. EPA, el máximo de la CDMX se presentó en MER con 30 ppb (45 µg/m^3) y en el EDOMEX se registró un valor de 28 ppb (42 µg/m^3) en Tlalnepantla (TLA); mientras que los mínimos del promedio anual también ocurrieron en TAH (16 ppb = 24 µg/m^3) en CDMX, así como en Acolman (ACO) y MON (14 ppb = 21 µg/m^3) ubicadas en EDOMEX y con un entorno semirrural.

En el indicador diario de la OMS, el máximo se presentó en MER (51 ppb = 76 µg/m^3) para la CDMX y en el EDOMEX fue en la estación TLA (49 ppb = 73 µg/m^3), los valores mínimos de este indicador se presentaron en los sitios Milpa Alta (MPA) con 14 ppb (21 µg/m^3) para CDMX y en MON con 25 ppb (37 µg/m^3) para el EDOMEX, ambas estaciones en la periferia de la ZMCM. Por último, en el promedio trianual del P98 del máximo horario establecido en la NAAQS de la U.S. EPA, el máximo se registró en los sitios Santiago Acahualtepec (SAC) y MER, ambos con 64 ppb y en el EDOMEX fue en FES Acatlán (FAC) con 66 ppb; el valor mínimo en este indicador fue 11 ppb, el cual se presentó en MPA ubicada en CDMX y para EDOMEX fue de 37 ppb en ACO.

Tabla 1.5. Valores de concentración máxima de NO_2 con respecto a los indicadores y límites de la NOM-023-SSA1-2021, OMS y NAAQS de la U.S. EPA.

Entidad	NOM		OMS			U.S. EPA	
	Máximo 1h	Promedio anual	Máximo 1h	P99 del promedio 24h	Promedio anual	Promedio trianual del P98 del máx. 1h	Promedio anual
	106 ppb	21 ppb	200 µg/m³	25 µg/m³	10 µg/m³	100 ppb	53 ppb
ZMCM	119 ppb	30 ppb	177 µg/m³	76 µg/m³	45 µg/m³	66 ppb	30 ppb
CDMX	112 ppb	30 ppb	167 µg/m³	76 µg/m³	45 µg/m³	64 ppb	30 ppb
EDOMEX	119 ppb	28 ppb	177 µg/m³	73 µg/m³	42 µg/m³	66 ppb	28 ppb

Notas:
Se resaltan en **rojo** los valores que rebasan los límites.
Los datos en la columna **OMS** fueron convertidos a µg/m³ con una temperatura de 17°C y 585 mmHg de presión.
La **U.S. EPA** se refiere a la institución internacional que establece estándares (NAAQS) en Estados Unidos de América.

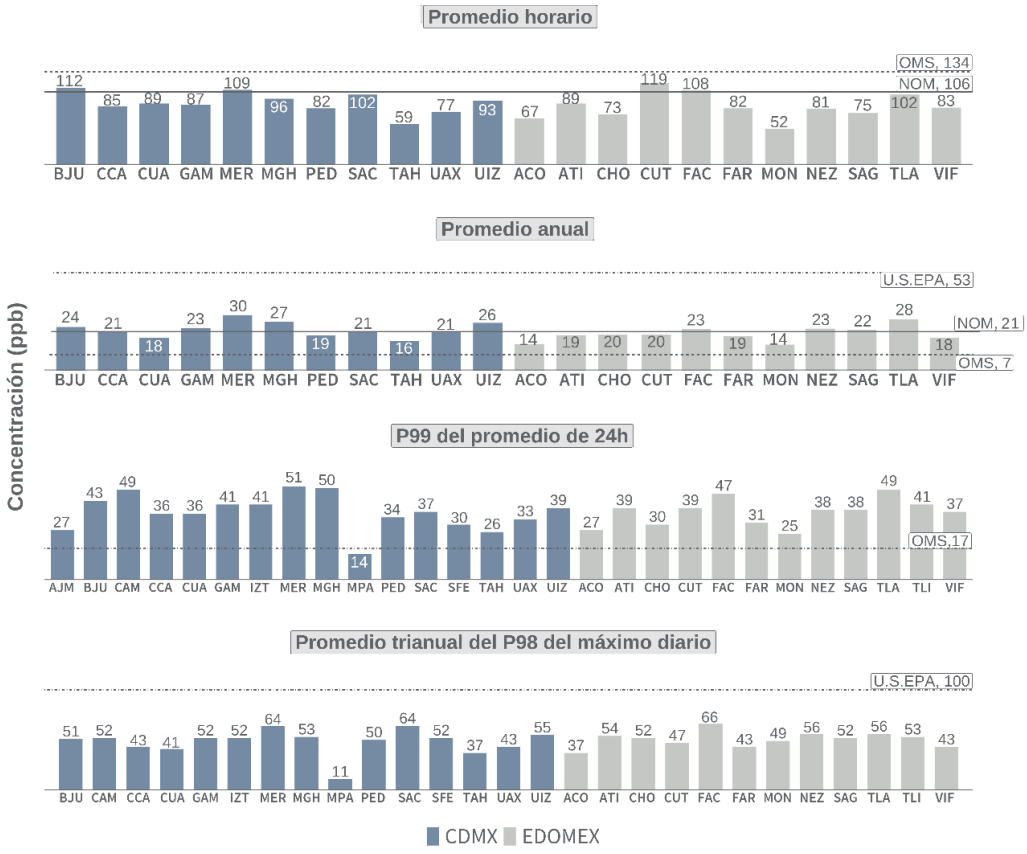


Figura 1.5. Concentración máxima de NO_2 con respecto a los indicadores y límites de la NOM-023-SSA1-2021, OMS convertido a ppb con 17°C, 585 mmHg) y NAAQS de la U.S. EPA, por estación de monitoreo.

MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

El monóxido de carbono es un gas que es emitido principalmente por la quema de combustibles fósiles en fuentes móviles. De acuerdo con el último Inventario de Emisiones en la ZMCM (SEDEMA, 2023b), más del 95 % de las emisiones totales de CO corresponden a los automóviles, con la mayor contribución de las motocicletas (39 %), autos particulares (19 %), taxis (18 %) y microbuses (7 %). Las fuentes de área tienen un aporte de 4 % del total de CO en la zona metropolitana, con la quema al cielo abierto y la combustión habitacional con más aportación dentro de este tipo de fuentes.

En los efectos al ambiente, el CO se clasifica como un agente climático de vida corta que contribuye indirectamente al cambio climático porque participa en reacciones químicas en la atmósfera que producen otros gases que modifican el clima (CARB, 2024a).

El CO tiene efectos importantes en la salud, ya que cuando es inhalado se adhiere a la hemoglobina de los glóbulos rojos. La hemoglobina normalmente transporta oxígeno por todo el cuerpo y cuando el CO se adhiere a la hemoglobina, bloquea el oxígeno que el cuerpo necesita. Los síntomas de la exposición a niveles altos de CO son mareos, náuseas, confusión, dolor de cabeza y pecho, dificultad para respirar, visión borrosa, falta de coordinación, pérdida del conocimiento e incluso la muerte (*American Lung Association*, 2024b).

Los niveles de concentración muy altos de CO al aire libre no son frecuentes y es un contaminante que presenta concentraciones bajas a nivel mundial. Sin embargo, cuando los niveles de CO son muy altos pueden afectar a las personas con enfermedades cardíacas, las cuales ya presentan una capacidad reducida para llevar sangre oxigenada al corazón en situaciones en las que necesitan más oxígeno de lo habitual y son especialmente vulnerables a los efectos del CO cuando hacen ejercicio o están sometidos a un mayor estrés. En estas situaciones, la exposición a corto plazo a estos niveles de CO puede provocar una reducción de oxígeno en el corazón acompañada de dolor en el pecho, también conocido como angina (U.S. EPA, 2024b). También, el CO está asociado a las admisiones hospitalarias y visitas a urgencias relacionadas con enfermedad cardiaca isquémica y efectos en el sistema cardiovascular (WHO, 2021), también se han documentado evidencia del aumento de riesgo de hospitalización por enfermedades respiratorias como asma, enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), infección del tracto respiratorio inferior e influenza-neumonía (Song et al., 2023).

Evaluación de la Norma

En México, los límites del CO están en la NOM-021-SSA1-2021, recién actualizada a finales del 2021. En la primera versión de esta NOM publicada en 1994 (NOM-021-SSA1-1993), se establecía un valor límite de 11 ppm para el promedio móvil de 8 horas. En la ZMCM, se cumplió con este límite durante 21 años consecutivos, desde 2001 hasta 2021, último año evaluado con la NOM de 1994.

En la actualización de la NOM del 2021 (**Figura 1.6**), se adoptó el límite de 9 ppm establecido en el estándar primario de la U.S. EPA y en la OMS del 2005 (10 000 µg/m^3 = 9 ppm; 25 °C, 1 atm) para el promedio móvil de 8 horas. Adicionalmente, se considera una métrica horaria, establecida en la guía OMS del 2005 correspondientes a 30 000 µg/m^3 (26 ppm; 25 °C, 1 atm). Es importante mencionar que la actualización de la NOM no consideró las nuevas guías OMS 2021, en las cuales el indicador de 1 hora aumentó a 35 000 µg/m^3 (30.6 ppm; 25 °C, 1 atm) y se agregó un indicador diario en 4 000 µg/m^3 (3.5 ppm; 25 °C, 1 atm), de acuerdo con la evidencia más reciente analizada por la OMS.

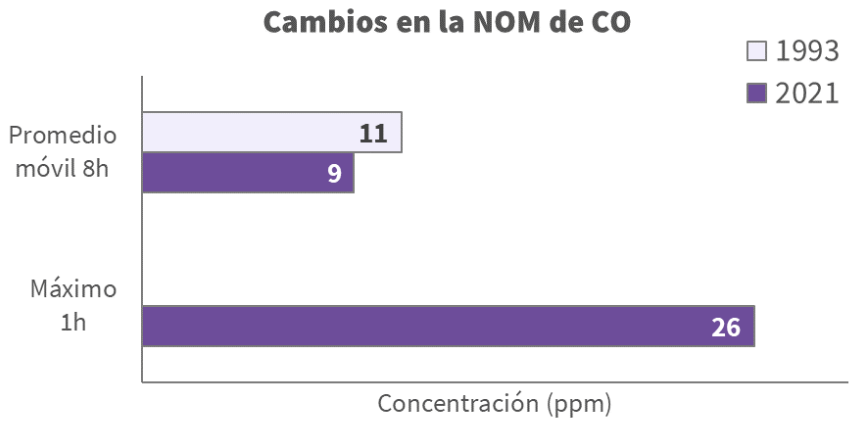


Figura 1.6. Cambios en los límites de la NOM-021-SSA1-**1993** y NOM-021-SSA1-**2021** correspondiente a CO.

En el máximo del promedio móvil de 8 h de CO desde 1994 al 2022 (**Figura 1.7**), se puede notar una reducción importante en la concentración de este contaminante, ya que de 1994 al 2000 se alcanzaron valores superiores a 10 ppm e incluso se registraron promedios móviles de 8h superiores a 15 ppm; sin embargo, a partir del 2001, la concentración máxima de CO fue menor al límite normado y sus valores continúan en reducción hasta la fecha. Este cambio en los niveles de CO, similar a NO_2, ocurrió debido a las políticas ambientales implementadas en las fuentes móviles, las cuales tienen la principal contribución a estos contaminantes. En 2022, con el nuevo límite de la NOM-021-SSA1-2021, la concentración máxima de CO todavía cumple con las especificaciones normadas.

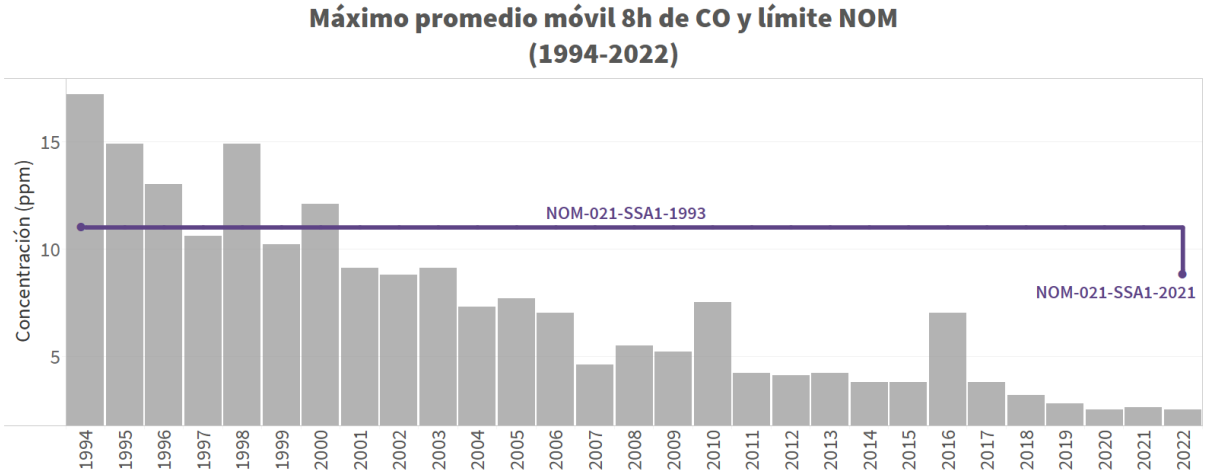


Figura 1.7. Concentración máxima del promedio móvil de 8h de CO (1994-2022) con respecto a los límites de la NOM-021-SSA1-1993 y NOM-021-SSA1-2021.

En la ZMCM, este contaminante presenta niveles bajos y durante 2022, todos los límites, nacionales e internacionales se cumplieron (**Tabla 1.4**). Para el promedio móvil de 8 horas, el cual se usa en la NOM, OMS y U.S. EPA; el máximo de la ZMCM fue 2.5 ppm (equivalentes a 2,264 µg/m^3; 17°C, 585 mmHg) que se registró en el EDOMEX, mientras que el valor más alto de la CDMX fue 2.4 ppm (2,173 µg/m^3). En el indicador horario (NOM y OMS), se alcanzó un máximo de 4.5 ppm (4,066 µg/m^3) en CDMX y para EDOMEX fue 4.4 ppm (3,948 µg/m^3). El indicador del P99 del promedio 24h de la OMS, tuvo su máximo en EDOMEX con 1,117 µg/m^3 (1.3 ppm) y para CDMX fue 996 µg/m^3 (1.1 ppm).

A nivel estación (**Figura 1.8**), los máximos del promedio móvil de 8h se presentaron en SAC con 2.4 ppm (2,173 µg/m) para la CDMX y en el EDOMEX se registró en la estación VIF con 2.5 ppm (2,264 µg/m^3). Los mínimos de este indicador fueron de 1.1 ppm en los sitios Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA), Cuajimalpa (CUA) y Pedregal (PED), ubicados en CDMX; mientras que, para EDOMEX el mínimo se presentó en INN con 0.7 ppm (634 µg/m^3). En el indicador de 1 hora, los valores más altos se registraron en SAC con 4.5 ppm (4,066 µg/m^3) en CDMX y para EDOMEX fue en Chalco (CHO) con 4.4 ppm (3,948 µg/m^3); los mínimos fueron en PED con 1.7 ppm (1,494 µg/m^3) para CDMX y en INN con 1.3 ppm (1,168 µg/m^3) en EDOMEX.

Por último, el indicador del P99 del promedio 24 h de la OMS, registró el máximo de la CDMX en las estaciones SAC y MER, ambas con 996 µg/m^3 (1.1 ppm); mientras que para el EDOMEX fue en La Presa (LPR) con 1,117 µg/m^3 (1.3 ppm). Los mínimos de este indicador se presentaron en MPA y SFE en la CDMX, ambas con 453 µg/m^3 (0.5 ppm); para el EDOMEX, se registró en INN con 362 µg/m^3 (0.4 ppm).

Tabla 1.6. Valores de concentración máxima de CO con respecto a los indicadores y límites de la NOM-021-SSA1-2021, OMS y NAAQS de la U.S. EPA.

Entidad	NOM		OMS*			U.S. EPA	
	Promedio móvil 8h	Promedio horario	Promedio horario	Promedio móvil 8h	P99 del promedio 24h	Promedio 1h	Promedio móvil 8h
	9 ppm	26 ppm	35 000 µg/m³	10 000 µg/m³	4 000 µg/m³	35 ppm	9 ppm
ZMCM	2.5 ppm	4.5 ppm	4,066 µg/m³	2,264 µg/m³	1,117 µg/m³	4.5 ppm	2.5 ppm
CDMX	2.4 ppm	4.5 ppm	4,066 µg/m³	2,173 µg/m³	996 µg/m³	4.5 ppm	2.4 ppm
EDOMEX	2.5 ppm	4.4 ppm	3,948 µg/m³	2,264 µg/m³	1,117 µg/m³	4.4 ppm	2.5 ppm

Notas:
Los datos en la columna **OMS** fueron convertidos a µg/m³ con una temperatura de 17°C y 585 mmHg de presión.
La **U.S. EPA** se refiere a la institución internacional que establece estándares (NAAQS) en Estados Unidos de América.

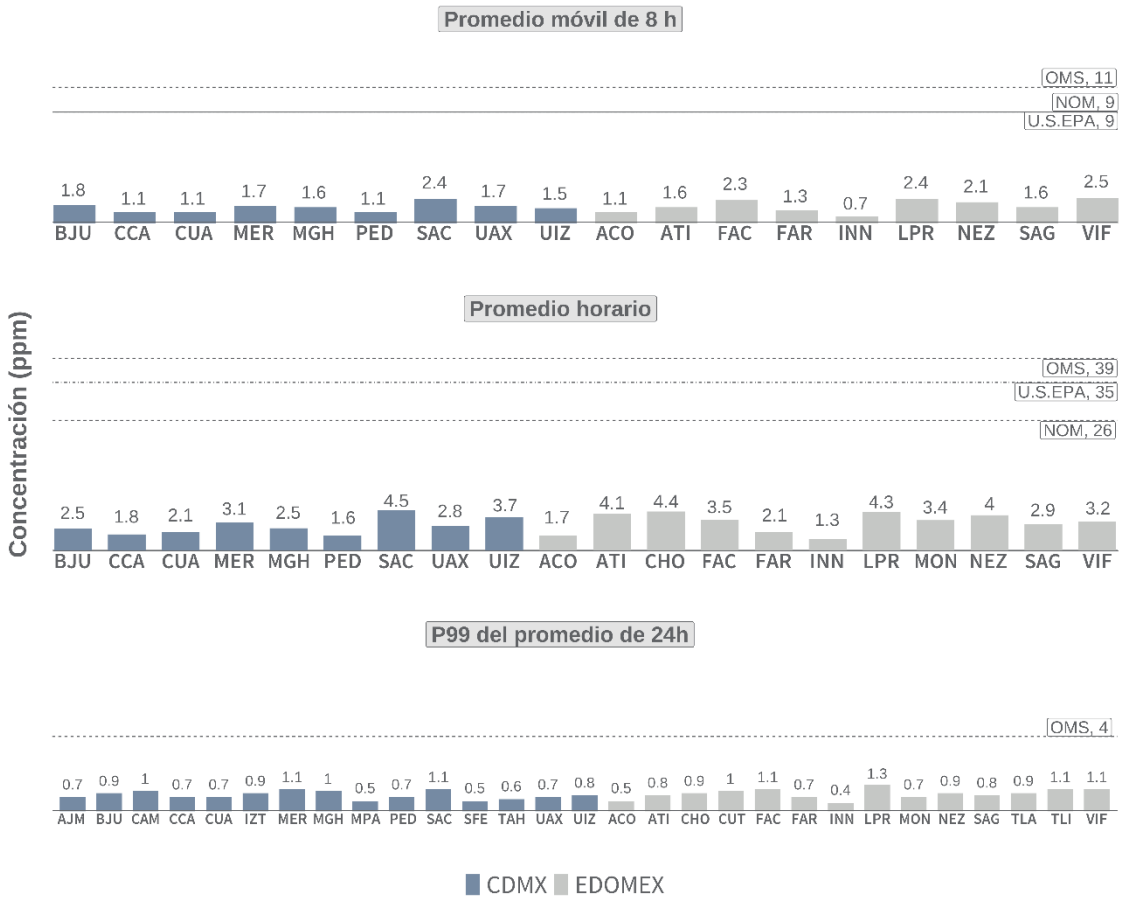


Figura 1.8. Concentración máxima de CO con respecto a los indicadores y límites de la NOM-021-SSA1-2021, OMS (convertido a ppm con 17 °C, 585 mmHg) y NAAQS de la U.S. EPA, por estación de monitoreo.

OZONO (O_3)

El ozono troposférico es un contaminante secundario, que se forma con los precursores Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) y óxidos de nitrógeno (NOx) en presencia de luz solar. En la ZMCM, los precursores de ozono provienen de diferentes fuentes, de acuerdo con el Inventario de emisiones 2020, la mayoría de los COV se generan en fuentes de área (p. ej. Uso de solventes, aguas residuales, combustión gas LP) con un 64 % del total de estos compuestos, seguido de las fuentes móviles con 26 % y las emisiones naturales de la vegetación, con el 7 %; por otro lado, los NOx provienen de las fuentes móviles con 84 % y de área con el 10 % (SEDEMA, 2023b).

Este contaminante tiene diversos efectos negativos en el ambiente, como gas de efecto invernadero y, además, daña la vegetación. Se han reportado diversos estudios sobre los efectos del ozono sobre cultivos, bosques y vegetación en general, ya que este contaminante interfiere con la captura de CO_2, ocasiona pérdida de clorofila y afecta la fotosíntesis de las plantas (Dhir, 2016), lo que disminuye el rendimiento de algunos cultivos como trigo, frijol, maíz, tomate, entre otros (Mills et al., 2007); también afecta los bosques, ya que causa reducciones en el crecimiento y cantidad de biomasa en algunas especies de árboles forestales (Paoletti, 2009).

En términos de salud humana, el ozono también causa efectos importantes y síntomas como dificultad para respirar, irritación de garganta, sibilancias y tos; ataques de asma; mayor riesgo de infecciones respiratorias y susceptibilidad a la inflamación pulmonar; aumento de hospitalizaciones o visitas a urgencias de personas con enfermedades pulmonares, como asma o EPOC, bronquitis (*American Lung Association*, 2024c; U.S. EPA, 2024c). De acuerdo con la última revisión de la OMS, la exposición al ozono también está relacionada con muertes prematuras por síntomas respiratorios y cardiovasculares (WHO, 2021). Se ha encontrado evidencia de mortalidad cardiovascular por exposición a corto plazo que se asocian a las condiciones de temperatura y época del año, en las que el riesgo aumenta durante la temporada cálida, con temperaturas altas y calor extremo (Gao et al., 2023).

En diversos estudios se ha buscado un umbral "seguro" de ozono, en el cual los efectos a la salud sean mínimos o nulos, pero existe poca evidencia sobre esto; en el estudio de C. Chen et al. (2023) se estimó que el rango de 60 a 100 µg/m^3 en el promedio de 8h (equivalentes a 31 a 51 ppb; 25°C y 1 atm) se puede considerar como seguro; sin embargo, no es concluyente. En otros estudios encontraron que aún con niveles de fondo, el ozono se relaciona con muertes prematuras; en Bell et al. (2006) se estimó que una exposición de corto plazo a concentración de 10 a 20 ppb todavía está asociada con muertes prematuras; mientras que en Stylianou et al. (2009) se sugiere un umbral en el rango de 10 a 45 ppb.

Evaluación de la Norma

A nivel nacional, el ozono está regulado por la NOM-020-SSA1-2021 que también fue actualizada a finales del 2021. La NOM de ozono ha tenido varios cambios desde su primera versión de 1994 (**Figura 1.9**), en la que sólo se consideraba el límite horario (110 ppb); posteriormente, en 2002, se agregó la métrica del promedio móvil de 8h en 80 ppb. La siguiente revisión de la NOM fue en 2014, en la cual se disminuyeron ambos límites: el promedio horario se estableció en 95 ppb (reducción del 14 % con respecto al valor anterior) y el promedio móvil de 8h en 70 ppb (reducción del 12 %). Finalmente, en 2021 el límite horario se estableció en 90 ppb, mientras que para el promedio móvil se determinaron tres valores graduales, el periodo **2022-2023** será evaluado con 65 ppb, **2024-2025** con 60 ppb y a partir del **2026**, el indicador de 8h tendrá el límite de 51 ppb, lo que es equivalente a 100 µg/m^3 (condiciones 25°C y 1 atm) que establece la OMS en 2005 y 2021.

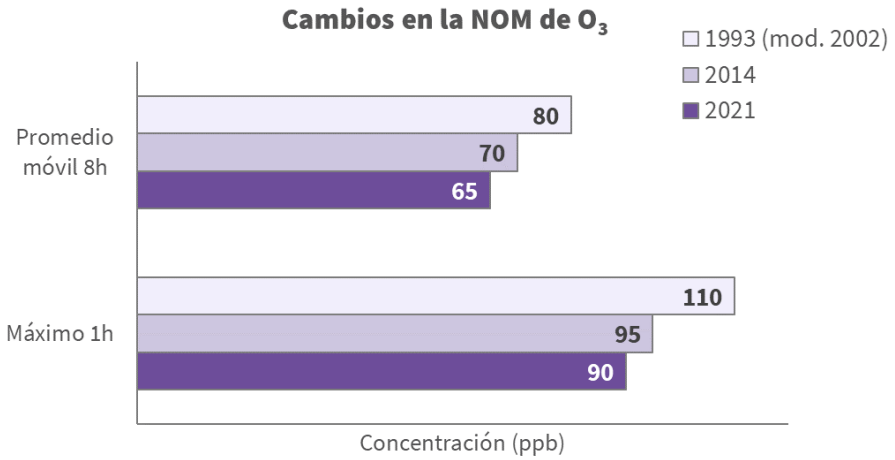


Figura 1.9. Cambios en los límites de la NOM-020-SSA1-**1993** (modificada en **2002** para agregar el indicador de 8h), NOM-020-SSA1-**2014** y NOM-020-SSA1-**2021** correspondiente a O_3.

La concentración de ozono es una problemática constante en la ZMCM y aunque los niveles del contaminante han disminuido considerablemente desde la década de los noventa, todavía se superan los límites de la NOM que son cada vez más estrictos. En el análisis de la evolución de la concentración de ozono y los cambios que ha presentado la normatividad (**Figura 1.10**), se puede observar que el nivel de ozono se redujo y se ha mantenido constante en los últimos años, pero al establecer un límite menor, la concentración de ozono excederá el umbral en mayor proporción y frecuencia que en las NOM anteriores, lo que puede percibirse como un empeoramiento en la calidad del aire; sin embargo, esto no significa un aumento repentino en los niveles del contaminante.

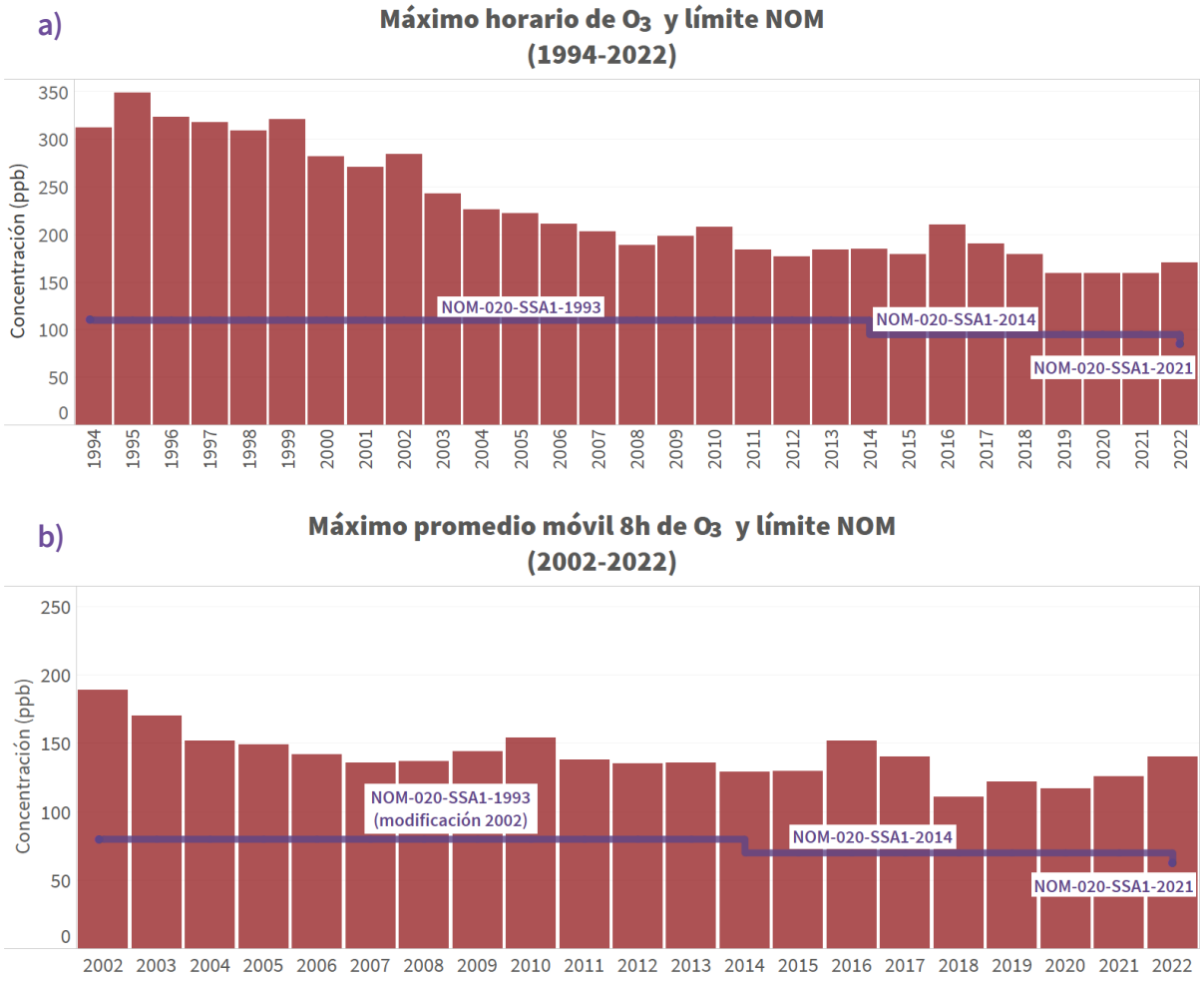


Figura 1.10. Concentración máxima horaria (a) y del promedio móvil de 8 h (b) para O_3 (1994-2022) con respecto a los límites de la NOM-020-SSA1-1993, NOM-020-SSA1-2014 y NOM-023-SSA1-2021.

El conteo de horas que superan el límite normado de una hora aumentó considerablemente con la modificación del umbral de 95 a 90 ppb. En la **Figura 1.11** se presenta la comparación del número de horas que se tendrían por año con ambos límites (NOM 2014 y NOM 2021), por ejemplo, el 2021, que fue el último año evaluado con 95 ppb, el límite se superó en 696 horas (SEDEMA, 2024) y con el umbral en 90 ppb, este mismo año hubiera registrado 794 horas, una diferencia de 98 horas equivalente a un incremento del 14 %. Esto se observa en todos los años, con la mayor diferencia de horas en el 2018 (198 horas, equivalente al 27 %).

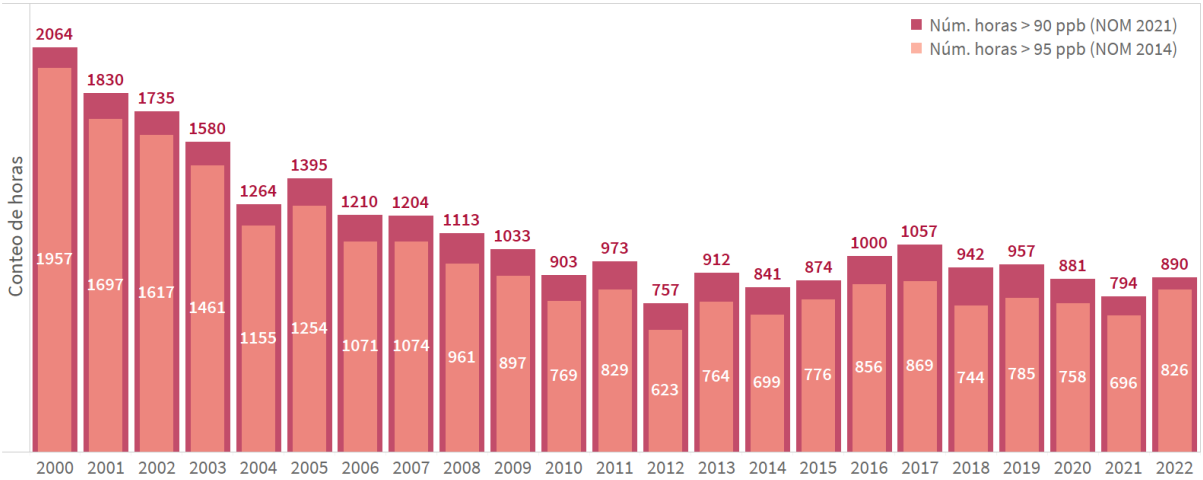


Figura 1.11. Conteo de horas con O_3 mayor a 90 (NOM-020-SSA1-2021) y 95 ppb (NOM-020-SSA1-2014) del 2000 al 2022.

Durante 2022, la concentración de ozono superó todos los límites nacionales e internacionales, en ambas entidades y los valores máximos fueron en la CDMX (**Tabla 1.7**). El límite horario de la NOM se superó en 890 horas para toda la ZMCM con un total de 816 horas, esto sucede por la trayectoria de los vientos y transporte de precursores hacia la CDMX. La concentración máxima del indicador horario fue 170 ppb, que se registró en CDMX durante un episodio de contingencia (20 de mayo 2022), el cual se puede consultar en el **capítulo 4** de este informe anual. El promedio móvil de 8 h de la NOM tuvo el máximo en la CDMX con 140 ppb. El P99 de 8h de la OMS se superó en ambas entidades, con el máximo en CDMX con 193 µg/m^3 (124 ppb, 17 °C, 585 mmHg) y para EDOMEX fue 163 µg/m^3 (105 ppb). Por último, el indicador trianual de 8h establecido en la NAAQS de la U.S. EPA también excedió el límite en toda la ZMCM, con un máximo de 113 ppb en CDMX.

Tabla 1.7. Valores de concentración máxima de O_3 con respecto a los indicadores y límites de la NOM-020-SSA1-2021, las guías de la OMS y los NAAQS de la U.S. EPA.

Entidad	NOM			OMS	U.S. EPA
	Número de horas máximo 1 h	Máximo horario	Promedio móvil 8 h	P99 del promedio móvil 8 h*	Promedio trianual del 4to máx. del móvil 8h
	90 ppb		65 ppb	100 µg/m^3	70 ppb
ZMCM	890 horas	170 ppb	140 ppb	193 µg/m^3	113 ppb
CDMX	816 horas	170 ppb	140 ppb	193 µg/m^3	113 ppb
EDOMEX	510 horas	146 ppb	112 ppb	163 µg/m^3	97 ppb

Notas:
Se resaltan en **rojo** los valores que rebasan los límites.
Los datos en la columna **OMS** fueron convertidos a µg/m^3 con una temperatura de 17°C y 585 mmHg de presión.
La **U.S. EPA** se refiere a la institución internacional que establece estándares (NAAQS) en Estados Unidos de América.

En el análisis por estación (**Figura 1.12**), los valores más altos fueron en la CDMX, en el indicador horario, el máximo fue 170 ppb en CUA y CCA tuvo mayor número de horas superando el límite NOM con 598 horas. En el EDOMEX, el máximo fue en FAC con 146 ppb y Nezahualcóyotl (NEZ) registró 274 horas en total. Los mínimos del promedio horario, para CDMX fueron en TAH con 136 ppb y en Gustavo A. Madero (GAM) con 195 horas que excedieron la NOM; mientras que, para el EDOMEX, ACO registró 112 ppb e INN tuvo un total de 12 horas, el cual fue el mínimo de horas en toda la ZMCM. En el promedio móvil de 8h, el máximo de la CDMX se presentó en CUA con 140 ppb, mientras que para el EDOMEX se registró Atizapán (ATI) y NEZ, ambas con 112 ppb. Los mínimos del promedio móvil 8h fueron en GAM con 102 ppb (CDMX) e INN con 84 ppb (EDOMEX). En los indicadores internacionales, la guía OMS tuvo su máximo en CCA con 193 µg/m^3 (equivalente a 124 ppb) para la CDMX y en TLA con 163 µg/m^3 (105 ppb); los mínimos fueron en GAM (152 µg/m^3 = 98 ppb) e INN (112 µg/m^3 = 72 ppb) para CDMX y EDOMEX, respectivamente. El estándar de la U.S. EPA tuvo el máximo de CDMX en CCA con 113 ppb y en EDOMEX fue en las estaciones CUT, FES Aragón (FAR) y NEZ, que registraron 97 ppb. Los mínimos en este indicador ocurrieron en Ajusco (AJU) y SAC, ambas con 93 ppb (CDMX), para EDOMEX fue en Los Laureles (LLA) con 77 ppb.

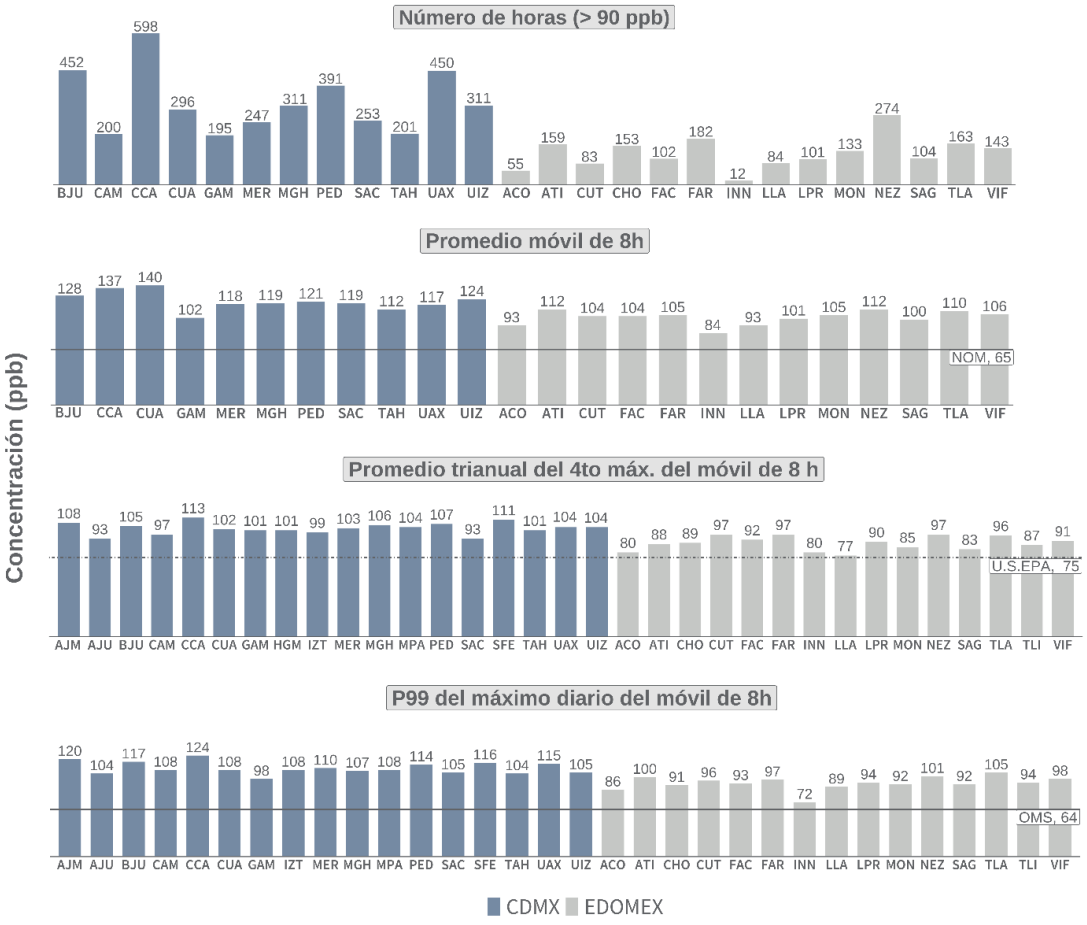


Figura 1.12. Concentración máxima de O_3 con respecto a los indicadores y límites de la NOM-020-SSA1-2021, OMS (convertido a ppb con 17°C, 585 mmHg) y NAAQS de la U.S. EPA, por estación de monitoreo.

PARTÍCULAS MENORES A 10 µm (PM_{10})

Las partículas en suspensión (PM) en el aire son una mezcla de muchas especies químicas. Es una combinación compleja de sólidos y aerosoles. Las partículas varían ampliamente en tamaño, forma y composición química, ya que pueden contener iones inorgánicos, metales, carbono elemental, compuestos orgánicos y de corteza terrestre. Las partículas se clasifican por su diámetro y con base en esta clasificación se aplican estándares de calidad del aire a nivel internacional. Las partículas que tienen un diámetro de 10 micrómetros (µm) o menos se les denomina PM_{10}, mientras que las que tienen un diámetro de 2.5 µm o menos son las $PM_{2.5}$. El tamaño de las partículas determina el grado de daño y efectos en la salud, entre más pequeño su diámetro, son más peligrosas ya que entran a niveles profundos del sistema respiratorio y cardiaco.

Las partículas PM_{10} tienen diversos orígenes que dependen del tipo de fuentes en los alrededores, eventos atípicos como tolvaneras o incendios forestales. En la ZMCM, las PM_{10} provienen principalmente de fuentes de área con un 42 % de contribución (p. ej. quema a cielo abierto, agricultura, vialidades con y sin pavimentar), seguidas de las fuentes móviles con 41 %, especialmente de autos particulares, taxis y vehículos de carga mayores a 3.8 toneladas. El resto de las emisiones de PM_{10} provienen de industrias y la erosión del suelo (SEDEMA, 2023b).

En términos ambientales, las partículas pueden alterar la absorción de la luz y su dispersión en la atmósfera, reducen la visibilidad, afectan el clima, los ecosistemas y los materiales. Las partículas afectan la vegetación, ya que su deposición sobre la superficie de las hojas reduce la absorción de radiación fotosintéticamente activa (PAR, por sus siglas en inglés), lo cual disminuye la fijación del carbono e interfiere en el proceso de la fotosíntesis (Honour et al., 2009), mientras que los compuestos metálicos y orgánicos contenidos en las partículas tienen un mayor potencial para alterar el crecimiento y el rendimiento de las plantas (CARB, 2024b). La deposición de partículas tiene consecuencias negativas en los ecosistemas, el suelo y agua. En cuanto al cambio climático, algunos componentes de la mezcla de partículas pueden promover el calentamiento global (p. ej., carbono negro).

Las PM_{10} tienen efectos en la salud, diversos estudios han relacionado este tipo de partículas con la morbilidad del EPOC, tanto el desarrollo de la enfermedad (Schikowski et al., 2005; van Eeden et al, 2001), como en la exacerbación (Li et al., 2016). Las PM_{10} pueden ser filtradas por los mecanismos de defensa del cuerpo y son muy grandes para atravesar las células epiteliales alveolares; sin embargo, se depositan en la superficie de las vías respiratorias y causan respuestas inflamatorias tanto pulmonares como sistémicas, así como la alteración de la función cardíaca (Newell et al., 2017).

Los efectos a corto plazo de las PM_{10} incluyen un mayor riesgo de mortalidad respiratoria, cardiovascular (Liu et al., 2019) y cerebrovascular (Orellano et al., 2020), exacerbación de enfermedades respiratorias como EPOC y asma, esto incrementa las visitas a urgencias e ingresos hospitalarios. En el largo plazo, existe evidencia de la relación entre las PM_{10} y el cáncer (Hamra et al., 2014), así como mayor riesgo en padecimientos como el COVID-19 (Marquès et al., 2022).

Evaluación de la Norma

En México, las partículas son reguladas por la NOM-025-SSA1-2021, actualizada a finales del 2021 (**Figura 1.13**). En la primera versión de la NOM de 1994, solamente se consideraban las PM_{10} con un límite de 150 µg/m³ para el promedio de 24 h y 50 µg/m³ para el promedio anual. En 2005, se modificó para agregar $PM_{2.5}$ y Partículas Suspendidas Totales (PST), así como reducir el umbral para las PM_{10} a un valor de 120 µg/m³ (promedio 24h) y la media anual se mantuvo en 50 µg/m³. En la revisión del 2014, los límites se hicieron más estrictos; para PM_{10} el promedio de 24h se estableció en 75 µg/m³, lo cual fue una reducción del 38 % en comparación con el valor anterior y el indicador anual quedó en 40 µg/m³ (disminución del 20 %).

Finalmente, la actualización del 2021 tiene valores **graduales** para cada periodo: **2022–2023** serán evaluados con 70 µg/m³ (promedio 24h) y 36 µg/m³ (promedio anual); de **2024–2025**, se usarán los límites de 60 µg/m³ y 28 µg/m³ para el promedio 24h y anual, respectivamente; a partir del **2026**, la concentración de PM_{10} se evaluará con 50 µg/m³ (promedio 24h) y 20 µg/m³ (promedio anual). Estos últimos corresponden a las guías de calidad del aire de la OMS establecidas en 2005; sin embargo, no se consideraron los valores guía en la actualización del 2021, que disminuyeron de 50 a 45 µg/m³ (promedio 24h) y de 20 a 15 µg/m³ (promedio anual).

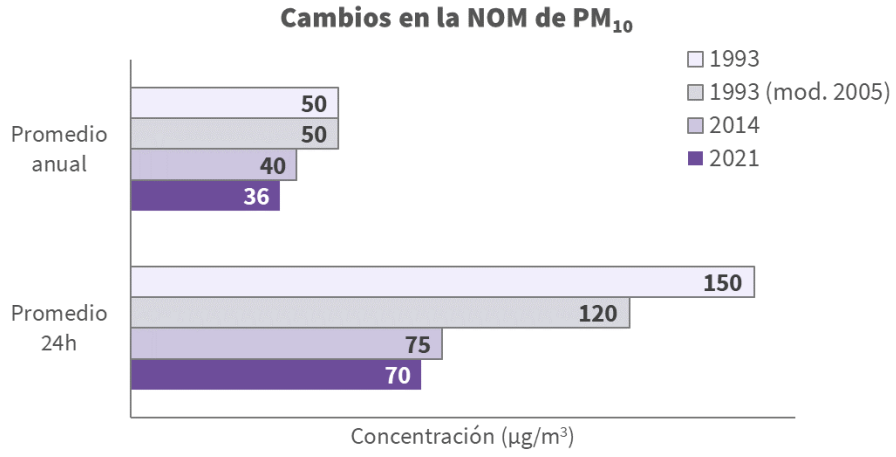


Figura 1.13. Cambios en los límites de la NOM-025-SSA1-**1993** y su modificación del 2005, la NOM-025-SSA1-**2014** y NOM-025-SSA1-**2021** correspondiente a PM_{10}

La concentración de PM_{10} constantemente supera los límites en la ZMCM y aunque los niveles del contaminante han disminuido desde la década de los noventa, todavía se alcanzan valores superiores a los límites normados que son cada vez más bajos. En el análisis de la evolución de la concentración de PM_{10} y los cambios que ha presentado la normatividad (**Figura 1.14**), se puede observar que sus niveles han disminuido desde el 2012 a la actualidad, ya que los máximos del promedio de 24h y anual, tienen menores concentraciones en comparación con las décadas anteriores, donde se presentaban niveles casi tres veces mayores a los valores normados; sin embargo, con los límites actualizados, la concentración de PM_{10} supera el umbral en mayor proporción que en su NOM de versiones anteriores.

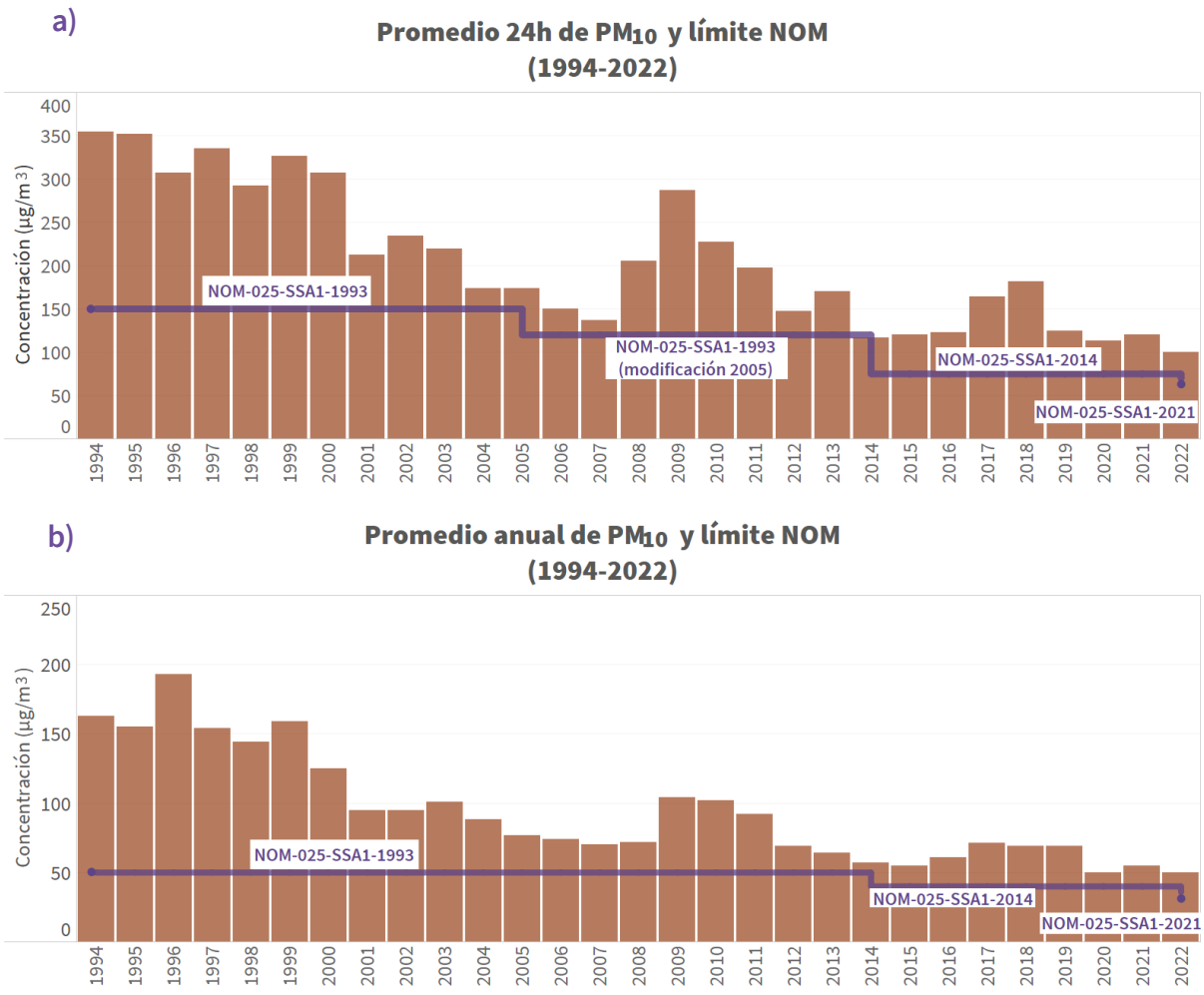


Figura 1.14. Concentración máxima del promedio de 24h (**a**) y del promedio anual (**b**) para PM_{10} (1994-2022) con respecto a los límites de la NOM-025-SSA1-1993, NOM-025-SSA1-2014 y NOM-025-SSA1-2021.

En 2022, la concentración de PM_{10} superó los límites nacionales, así como los de la OMS, mientras que los estándares de la U.S. EPA no fueron excedidos en ninguna entidad (**Tabla 1.8**). Los valores más altos fueron en EDOMEX, debido a la cantidad de fuentes y emisiones en la zona. El máximo del P99 del promedio de 24 h, usado en la NOM y OMS, fue en el EDOMEX con 100 µg/m³, mientras que en CDMX fue 80 µg/m³, para el indicador anual (NOM y OMS), el máximo de EDOMEX fue 50 µg/m³ y para CDMX fue 41 µg/m³. La métrica trianual de la U.S. EPA obtuvo su máximo en EDOMEX con 108 µg/m³ y en CDMX con 74 µg/m³, ambos valores cumplieron con el estándar.

A nivel estación (**Figura 1.15**), para el EDOMEX el máximo del P99 del promedio de 24h (NOM y OMS) fue en La Presa (LPR) con 100 µg/m³ y en CDMX se presentó en MER con 80 µg/m³, mientras que los mínimos se registraron en PED (CDMX) y NEZ (EDOMEX), con 58 µg/m³ y 79 µg/m³, respectivamente. Para el promedio anual (NOM y OMS), el máximo fue en MER y UAM Iztapalapa (UIZ) en la CDMX, ambas con 41 µg/m³, en EDOMEX fue en La Presa (LPR) con 50 µg/m³; los mínimos anuales también se presentaron en PED con 30 µg/m³ y en NEZ con 39 µg/m³. Es importante mencionar que la única estación que cumplió con ambos indicadores de la NOM durante 2022 fue PED en la CDMX. Para el indicador de la U.S. EPA, el promedio trianual de 24h más alto se registró en XAL con 108 µg/m³ para el EDOMEX y para CDMX fue en MER con 74 µg/m³, mientras que los mínimos fueron en PED (57 µg/m³) y NEZ (71 µg/m³), para CDMX y EDOMEX, respectivamente.

Tabla 1.8. Valores de concentración máxima de PM_{10} con respecto a los indicadores y límites de la NOM-025-SSA1-2021, OMS y NAAQS de la U.S. EPA.

Entidad	NOM		OMS		U.S. EPA
	P99 del promedio 24 h	Promedio anual	P99 del promedio 24 h	Promedio anual	Promedio trianual del 2do máx. de 24h
	70 µg/m³	36 µg/m³	45 µg/m³	15 µg/m³	150 µg/m³
ZMCM	100 µg/m³	50 µg/m³	100 µg/m³	50 µg/m³	108 µg/m³
CDMX	80 µg/m³	41 µg/m³	80 µg/m³	41 µg/m³	74 µg/m³
EDOMEX	100 µg/m³	50 µg/m³	100 µg/m³	50 µg/m³	108 µg/m³

Notas:
Se resaltan en **rojo** los valores que rebasan los límites.
Los datos presentados de PM_{10} corresponden al monitoreo de la REDMA, que usan el método de referencia designado por la U.S. EPA.
La **U.S. EPA** se refiere a la institución internacional que establece estándares (NAAQS) en Estados Unidos de América.

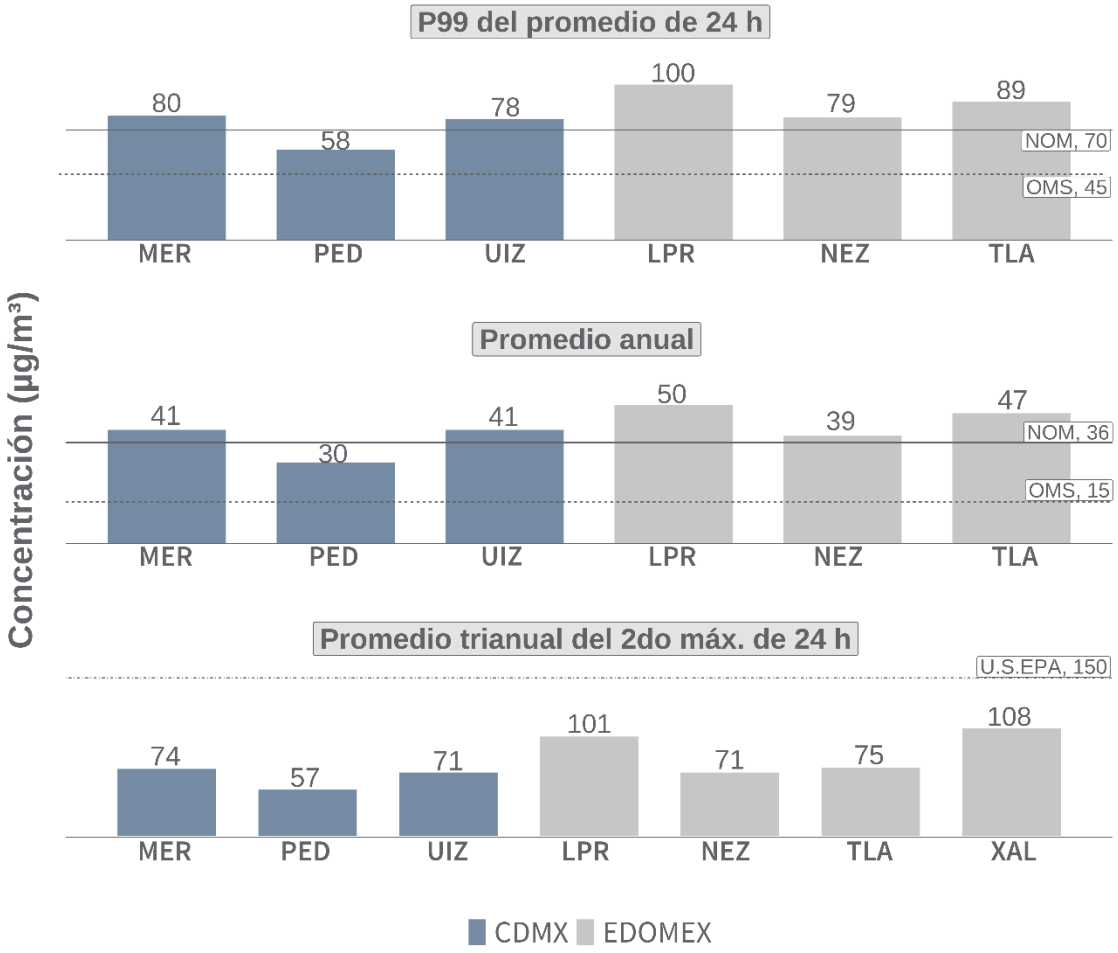


Figura 1.15. Concentración máxima de PM_{10} con respecto a los indicadores y límites de la NOM-025-SSA1-2021, OMS y NAAQS de la U.S. EPA, por estación de monitoreo.

PARTÍCULAS MENORES A 2.5 µm ($PM_{2.5}$)

Las partículas menores a 2.5 µm ($PM_{2.5}$), también conocidas como partículas finas, tienen un origen diverso, una porción de estas partículas son primarias, es decir, se emiten directamente de una fuente; también hay partículas secundarias, las cuales se generan en la atmósfera a partir de reacciones químicas y mezcla con gases, otros aerosoles, compuestos biológicos, entre otros. Las partículas primarias $PM_{2.5}$ se pueden originar de fuentes naturales (p. ej. tormentas de polvo, incendios forestales) y de fuentes antropogénicas (pirotecnia, quema de combustibles fósiles y biomasa, cigarros, entre otras). En la ZMCM, las emisiones de $PM_{2.5}$ primarias provienen principalmente de fuentes móviles con un aporte del 42 % (vehículos de carga, tractocamiones, autobuses y autos particulares), seguido de las fuentes de área con 40 % (desechos urbanos, combustión habitacional o comercial, construcción y agricultura); mientras que las industrias contribuyen con el 14 %, especialmente en la generación y distribución de energía, industria alimentaria y de metales (SEDEMA, 2023b).

Las $PM_{2.5}$ tienen efectos en el ambiente, en el estudio de Wu & Zhang (2018) se encontró relación entre la concentración de $PM_{2.5}$ y la deposición ácida de sus compuestos, sobre el deterioro de las hojas en algunas especies de árboles. También se ha reportado otros efectos adversos en el ambiente como la visibilidad reducida, formación de lluvia ácida, smog fotoquímico y neblina (U.S. EPA, 2023), ya que debido al tamaño de las $PM_{2.5}$, se pueden acumular en la atmósfera, se transportan por largas distancias y permanecen más tiempo en el aire (Thangavel et al., 2022). Además, pueden contener carbono negro (BC, por sus siglas en inglés), el cual se produce a partir de la combustión incompleta de hidrocarburos, como combustibles fósiles, biocombustibles y biomasa. El BC tiene un papel importante en las interacciones luz-partículas en la atmósfera, debido a sus propiedades de absorción de luz y acumulación de calor (Zhang & Wang, 2011; Choomanee et al., 2024)., lo que favorece el calentamiento global y reducción de la visibilidad.

En términos de salud humana, las $PM_{2.5}$ son consideradas como uno de los contaminantes más peligrosos; en 2019 se estimó que, a nivel mundial, más de 4 millones de muertes son atribuibles específicamente a la exposición de $PM_{2.5}$ (UNEP, 2023). En un estudio reciente de Yu et al. (2024), se analizaron los datos del 2000 al 2019 en los continentes y en 13,189 zonas urbanas del mundo, donde se estimó que 1 millón de muertes prematuras en cada año fueron ocasionadas por la exposición a corto plazo de $PM_{2.5}$, con Asia y África, como los continentes con mayor proporción de muertes prematuras. Este tipo de partículas es más dañino a la salud debido a su tamaño, ya que alcanzan niveles profundos del sistema respiratorio y cardiovascular, incluso al torrente sanguíneo.

De acuerdo con la última Evaluación Científica Integral (ISA, por sus siglas en inglés) de la U.S. EPA, las $PM_{2.5}$ y la mortalidad tienen una relación causal, es decir, son consideradas causa de muerte, así como de efectos graves en el sistema cardiovascular y respiratorio. Los grupos en mayor riesgo son los niños, adultos mayores, las personas con padecimientos cardiovasculares y respiratorios, con sobrepeso u obesidad y personas fumadoras o exfumadoras (U.S. EPA, 2019). La exposición a corto plazo de $PM_{2.5}$ (24 horas) se ha relacionado con mortalidad prematura, aumento de ingresos hospitalarios y visitas a emergencias por causas cardíacas o pulmonares, bronquitis, exacerbación del asma y EPOC, también se ha reportado su asociación con incidencia de arritmia, de trombosis venosa profunda, accidentes cerebrovasculares, aumento de sibilancias, mayor susceptibilidad a infecciones respiratorias (Thangavel et al., 2022). La exposición a largo plazo (meses a años) se ha relacionado con la muerte prematura, particularmente en personas que padecen enfermedades cardíacas o pulmonares crónicas, aumento de la mortalidad por cáncer de pulmón y efectos en el sistema nervioso (Hamra et al., 2014; U.S. EPA, 2019). También hay estudios sobre la exposición crónica de $PM_{2.5}$ y su acumulación en los órganos reproductivos a través de las barreras en los tejidos reproductivos (epitelial, testicular y placentario); además, las $PM_{2.5}$ pueden alterar los niveles hormonales y afectar la fertilidad (Wang et al., 2021).

Evaluación de la Norma

A nivel nacional, las $PM_{2.5}$ son reguladas por la NOM-025-SSA1-2021 actualizada a finales del 2021 (**Figura 1.16**). En la primera versión de esta NOM, publicada en 1994, no se consideraban las $PM_{2.5}$ pero en 2005, se modificó para agregar $PM_{2.5}$ y Partículas Suspendidas Totales (PST). Los valores límite de $PM_{2.5}$ en esta actualización del 2005 se establecieron en 65 $\mu g/m^3$ (promedio 24h) y el promedio anual en 15 $\mu g/m^3$. En la revisión del 2014, los límites se hicieron más estrictos; en $PM_{2.5}$ el promedio de 24h se estableció en 45 $\mu g/m^3$, lo cual fue una reducción del 31% en comparación con el límite anterior y el umbral del indicador anual quedó en 12 $\mu g/m^3$ (disminución del 20%).

Finalmente, en la actualización del 2021 también se establecieron valores **graduales** en $PM_{2.5}$ para cada periodo: los años **2022** y **2023** serán evaluados con 41 $\mu g/m^3$ (promedio 24h) y 10 $\mu g/m^3$ (promedio anual); de **2024-2025**, se usarán los límites de 33 $\mu g/m^3$ y 10 $\mu g/m^3$ para el promedio 24h y anual, respectivamente; a partir del **2026**, la concentración máxima de $PM_{2.5}$ se evaluará con 25 $\mu g/m^3$ (promedio 24h) y 10 $\mu g/m^3$ (promedio anual). Estos últimos valores corresponden a las guías de calidad del aire de la OMS establecidas en 2005; sin embargo, no se consideraron los valores guía de la actualización del 2021, en las que se disminuyeron los umbrales de 25 a 15 $\mu g/m^3$ (promedio 24h) y de 10 a 5 $\mu g/m^3$ (promedio anual).

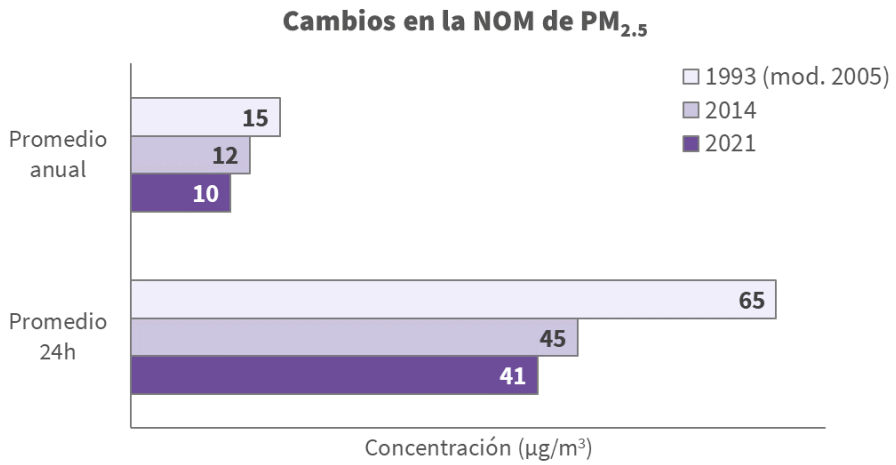


Figura 1.16. Cambios en los límites de la NOM-025-SSA1-**1993** (modificada en **2005** para agregar $PM_{2.5}$), NOM-025-SSA1-**2014** y NOM-025-SSA1-**2021** correspondiente a $PM_{2.5}$.

La concentración de $PM_{2.5}$ constantemente supera los límites en la ZMCM, especialmente en la temporada seca-fría (noviembre a febrero). Los niveles de este contaminante han sido variables a través de los años, en la **Figura 1.17** se observan que los valores máximos se registraron del 2017 al 2019 para el promedio de 24h y del 2004 al 2019 para el promedio anual. Mientras que el mínimo fue en 2020, este año estuvo influenciado por la pandemia COVID-19 y muchos sitios de la red Manual (REDMA) fueron restringidos debido a que se encontraban en hospitales, como fue el caso de la estación XAL, la cual históricamente registraba los máximos de partículas.

En la actualización de la NOM, con un límite más estricto, la concentración de $PM_{2.5}$ superará el umbral en mayor proporción y frecuencia que en su NOM de versiones anteriores; sin embargo, esto no implica que la concentración aumentó de manera repentina.

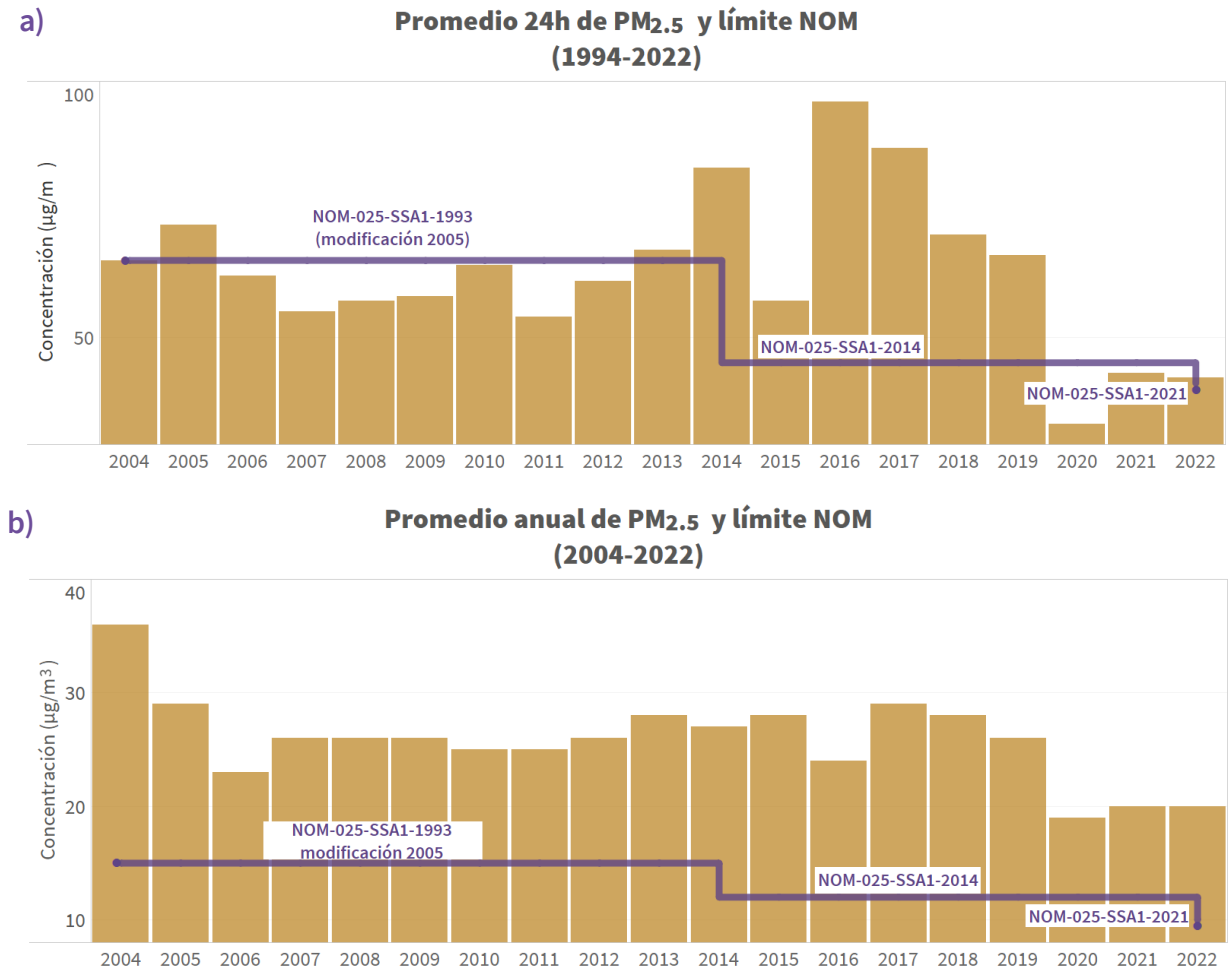


Figura 1.17. Concentración máxima del P99 del promedio de 24h (**a**) y del promedio anual (**b**) para $PM_{2.5}$ (2004-2022) con respecto a los límites de la NOM-025-SSA1-1993 (modificación 2005), NOM-025-SSA1-2014 y NOM-025-SSA1-2021.

Durante 2022, la concentración máxima de $PM_{2.5}$ no cumplió con los estándares nacionales o internacionales. En la **Tabla 1.9** se presentan los valores máximos en la ZMCM donde se puede observar que ambas entidades obtuvieron valores similares, esto debido a que las $PM_{2.5}$ tienen contribuciones de origen primario y secundario, en consecuencia, sus precursores se pueden transportar y favorecer la formación de partículas en varias regiones de la ZMCM. El límite del promedio de 24 h de la NOM y OMS se excedió en CDMX y EDOMEX, ambos con 42 µg/m^3, mientras que, para el promedio anual, el valor más alto de la ZMCM fue en EDOMEX con 20 µg/m^3. En los indicadores de la U. S. EPA, el indicador trianual de 24 h registró los máximos en EDOMEX con 44 µg/m^3 y 20 µg/m^3 para el promedio trianual.

Tabla 1.9. Valores de concentración máxima de $PM_{2.5}$ con respecto a los indicadores y límites de la NOM-025-SSA1-2021, OMS y NAAQS de la U.S. EPA.

Entidad	NOM		OMS		U.S. EPA	
	Promedio de 24 h	Promedio anual	P99 del promedio 24 h	Promedio anual	Promedio trianual del P98 de 24h	Promedio trianual
	41 µg/m³	10 µg/m³	15 µg/m³	5 µg/m³	35 µg/m³	12 µg/m³
ZMCM	42 µg/m³	20 µg/m³	42 µg/m³	20 µg/m³	44 µg/m³	20 µg/m³
CDMX	42 µg/m³	19 µg/m³	42 µg/m³	19 µg/m³	35 µg/m³	19 µg/m³
EDOMEX	42 µg/m³	20 µg/m³	42 µg/m³	20 µg/m³	44 µg/m³	20 µg/m³

Notas:
Los datos presentados de $PM_{2.5}$ corresponden al monitoreo de la REDMA, que usan el método de referencia designado por la U.S. EPA.
Se resaltan en **rojo** los valores que rebasan los límites.
La **U.S. EPA** se refiere a la institución internacional que establece estándares (NAAQS) en Estados Unidos de América.

En el análisis por estación (**Figura 1.18**), el máximo del P99 del promedio 24 h de la NOM y OMS fue en MER en CDMX y TLA en EDOMEX, ambas con 42 µg/m³; el mínimo fue en San Agustín (SAG) con 39 µg/m³ ubicada en EDOMEX. El promedio anual, evaluado en la NOM y OMS, registró los valores más altos en los sitios TLA con 20 µg/m³ (EDOMEX) y MER con 19 µg/m³ (CDMX), por otro lado, los mínimos fueron en PED con 15 µg/m³ (CDMX) y en SAG con 17 µg/m³ (EDOMEX).

Los indicadores de los estándares de la U.S. EPA, el promedio trianual del P98 (24h) obtuvo su máximo en XAL con 44 µg/m³ (EDOMEX) y en MER con 35 µg/m³ (CDMX); los mínimos de este indicador fueron en SAG con 33 µg/m³ para el EDOMEX y para la CDMX fue en PED con 27 µg/m³. El promedio trianual registró sus valores más altos en TLA (20 µg/m³) y MER (19 µg/m³), para el EDOMEX y CDMX, respectivamente; mientras que los mínimos siguieron el mismo patrón en los indicadores anteriores, en los sitios SAG con 16 µg/m³ (EDOMEX) y PED con 14 µg/m³ (CDMX). El comportamiento de este tipo de partículas tuvo los máximos en las estaciones del norte de la ZMCM y MER en el centro, esto debido al tipo y cantidad de fuentes en la zona, como transporte de carga, industrias, así como mayor tránsito vehicular.

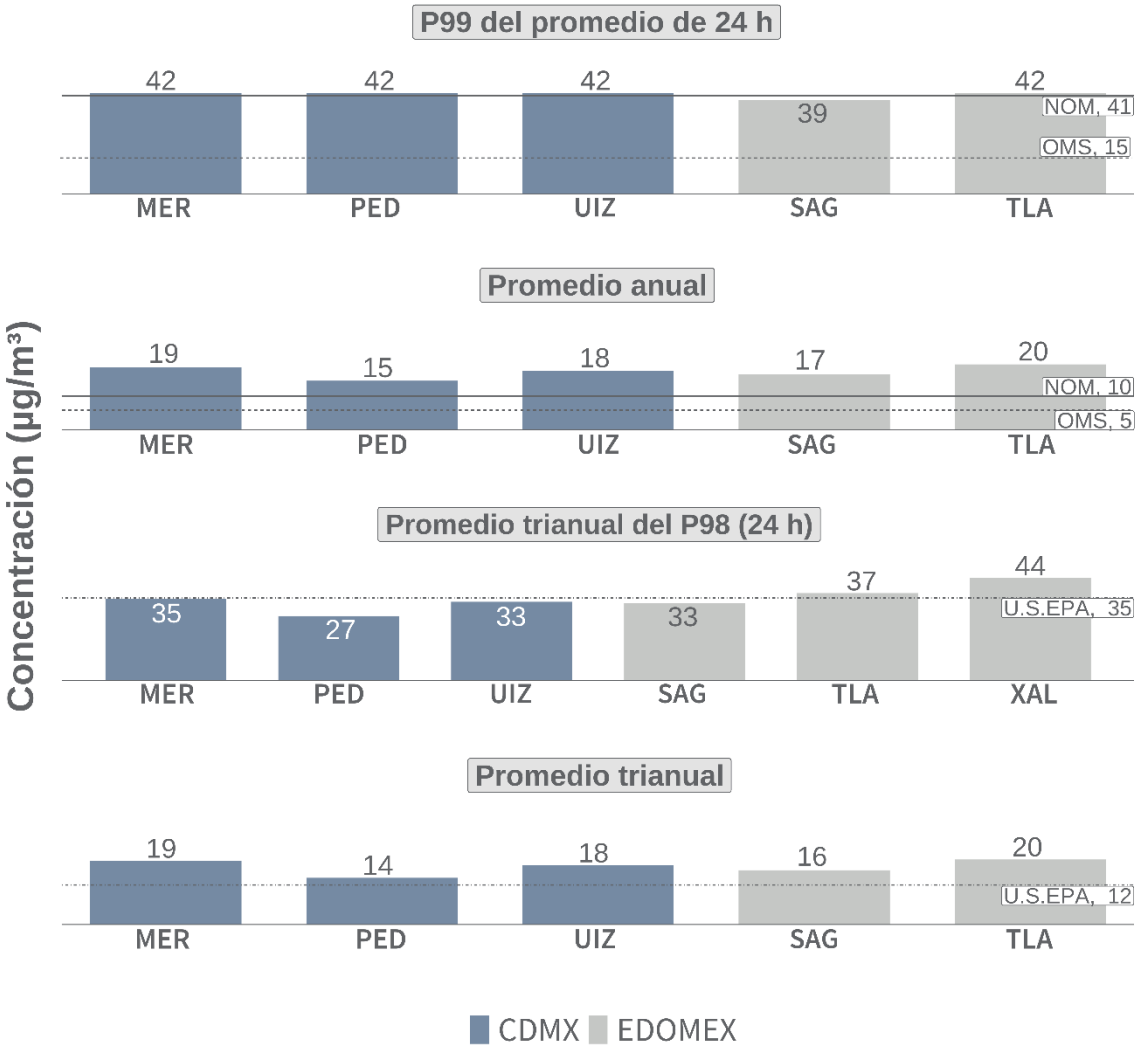


Figura 1.18. Concentración máxima de $PM_{2.5}$ con respecto a los indicadores y límites de la NOM-025-SSA1-2021, OMS y NAAQS de la U.S. EPA, por estación de monitoreo.

CAPÍTULO 2

El tiempo

TEMPERATURA

La temperatura del aire y el clima regional están influenciados por diferencias en la distribución de la energía solar en la superficie de la Tierra, así como por los procesos de transferencia de calor. Además, los cambios en la inclinación de la Tierra respecto del Sol en el transcurso del año ocasionan diferencias temporales y climáticas que se asocian a las estaciones del año (Godish, 1997). En los últimos años se ha observado una tendencia notable en el incremento de la temperatura global, como consecuencia del aumento de los gases de efecto invernadero (GEI) generados por actividad humana y que provocan el cambio climático, el cual, además del incremento en la temperatura global, también ocasiona alteraciones en los patrones climáticos; estas alteraciones ya se empiezan a observar con la frecuencia de eventos meteorológicos extremos.

El reporte climático anual del NCEI-NOAA (*National Center for Enviromental Information from National Oceanic and Atmospheric Administration*), indica que el año 2022 fue el sexto más cálido de todos los registros desde 1880, este superó la media del siglo XX (13.9 °C) en 0.86 °C. La clasificación de los 10 años más cálidos de todo el registro (1880-2022) se han observado desde 2010 a la fecha y el periodo del 2014 al 2022, están clasificados como los nueve años más cálidos.

Similar a 2021, el año 2022 inició con episodio de fase fría de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), conocida como La Niña, que persistió durante todo el año. En la **Figura 2.1** se observa que durante la fase cálida del ENSO, El Niño (rojo), en la que las temperaturas globales tienden a ser más altas que en los años con fases ENSO neutral (gris) o La Niña (azul), en las cuales las temperaturas tienden a ser ligeramente menores. Los datos de la NOAA indican que la temperatura anual global ha incrementado a una tasa promedio de 0.08 °C por década desde 1880 y más del doble de esa tasa (0.18 °C) desde 1981 (NOAA, 2023).

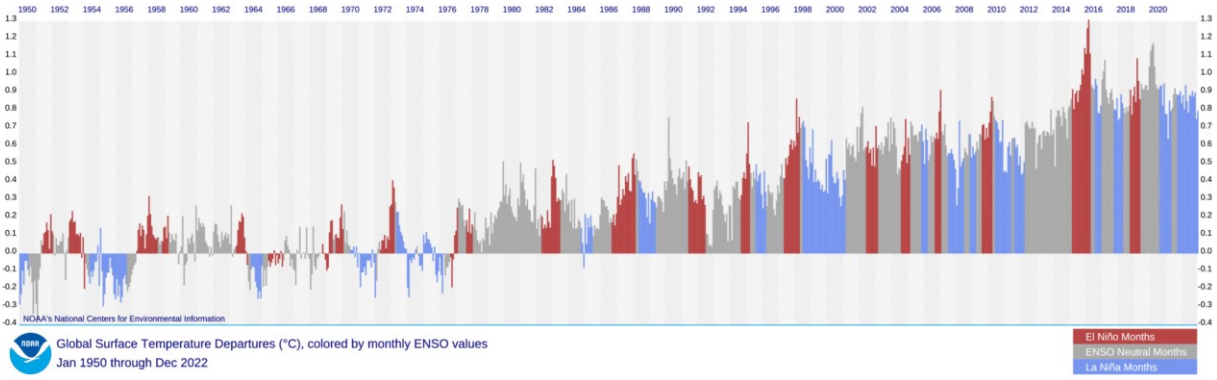


Figura 2.1. Anomalías de temperatura mensual global de 1950 a 2022. Las fases del ENSO son: El Niño (rojo), Neutro (gris), La Niña (azul). Fuente: NOAA (2023) https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202213

Existen diversos estudios que relacionan el aumento de temperatura con un mayor impacto negativo en la calidad del aire y, por lo tanto, en la salud de la población. En el análisis de Bloomer et al. (2009), se demostró la relación entre el incremento de temperatura y una mayor producción de ozono (O_3), por lo tanto, se pronostica que este contaminante tendrá niveles más altos si las temperaturas continúan en aumento. Este pronóstico significa que se tendrían que implementar reducciones importantes en las emisiones de los precursores de ozono, los óxidos de nitrógeno (NOX) y compuestos orgánicos volátiles (COV) para poder contrarrestar los efectos causados por el cambio climático. Otros contaminantes también pueden incrementar sus concentraciones en el aire como consecuencia del cambio climático, por ejemplo, las emisiones de partículas ocasionadas por incendios forestales aumentarán, relacionado con el aumento de temperatura y sequías extremas.

Comportamiento de la temperatura en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM)

La Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET) del SIMAT mide la temperatura en la ZMCM, y de acuerdo con los datos registrados, el 2022 tuvo un promedio anual de 16.9 °C (**Figura 2.2a**), este valor fue 0.3 °C superior al registrado en 2021 (16.6 °C). Esto es consistente con el reporte anual del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), en el cual indica que varias entidades del país registraron al 2022 como uno de los años más cálidos, por ejemplo, para Tlaxcala fue el segundo más cálido desde 1953, mientras que, para la Ciudad de México (CDMX), Guanajuato, Morelos, Querétaro y Zacatecas, 2022 fue el tercer año más cálido (SMN, 2023b). En el análisis mensual (**Figura 2.2b**), marzo a julio presentaron los promedios más altos y los meses más cálidos fueron mayo y abril con 20.3 y 19.1 °C, respectivamente, los valores de mayo se asociaron a la persistencia de sistemas de alta presión sobre el norte y centro del país, que causó una anomalía positiva de Radiación de Onda Larga Saliente (OLR) durante este mes, situación que ocasionó una inhibición de nubosidad y escasa humedad (SMN, 2022a). El promedio mensual mínimo se presentó en diciembre con 13.5 °C, este valor fue 0.6 °C menor al registrado en diciembre de 2021.

La temperatura máxima horaria del año fue 33.6 °C, registrada el 9 de mayo a las 15:00 h en la estación Santiago Acahualtepec (SAC). Por el contrario, la temperatura más baja fue de -1.8 °C, reportada a las 08:00 h del 3 de enero en la estación Ajusco (AJU), este el valor se asoció a la masa de aire polar del frente frío número 19 de la temporada 2021-2022, que se desplazó sobre el norte y el oriente del país, el cual provocó un descenso de temperatura en gran parte del territorio mexicano, con caída de aguanieve en las regiones montañosas de Tlaxcala, Puebla y Veracruz (SMN, 2023a).

En el perfil horario del 2022, se observó que las temperaturas mínimas se registraron entre las 06:00 y las 08:00 h, mientras que los máximos fueron entre las 14:00 y 17:00 h (**Figura 2.2c**). En el análisis por estación (**Figura 2.2d**), el promedio anual más alto se registró en el sitio FES Aragón (FAR) con 19.1 °C, ubicada en el noreste de la ZMVM; el segundo máximo fue 18.7 °C y se presentó en las estaciones San Agustín (SAG) y Gustavo A. Madero (GAM) en el noreste, así como en Merced (MER) en el centro. El sitio Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (INN) registró el promedio anual mínimo, con 11.1 °C, seguido de AJU y Ajusco Medio (AJM), ambas con 11.3 °C.

Esta distribución espacial de la temperatura, con los máximos en las estaciones del centro-noreste y los mínimos en los sitios de la periferia, es consistente con los años anteriores y está influenciado por la altura de las estaciones, su tipo de entorno (urbanizado, con vegetación, semirrural, etc.), así como por la trayectoria los vientos.

El análisis de anomalías mensuales de temperatura (**Figura 2.3**) indicó valores por encima del promedio (2008-2019) de marzo a mayo, en enero, julio y noviembre, con anomalías positivas que oscilan entre 0.4 y 1.3 °C con respecto al período de referencia; la anomalía positiva máxima fue en mayo con 1.3 °C. Mientras que, las anomalías negativas fueron menos significativas y se presentaron en febrero, junio, agosto, septiembre y diciembre, este último obtuvo la anomalía negativa más baja con -0.8 °C. El mes de octubre se mantuvo igual que el promedio 2008-2019. El detalle para el método de cálculo de anomalías se puede consultar en el Informe Anual de Calidad del Aire 2021 (SEDEMA, 2024).

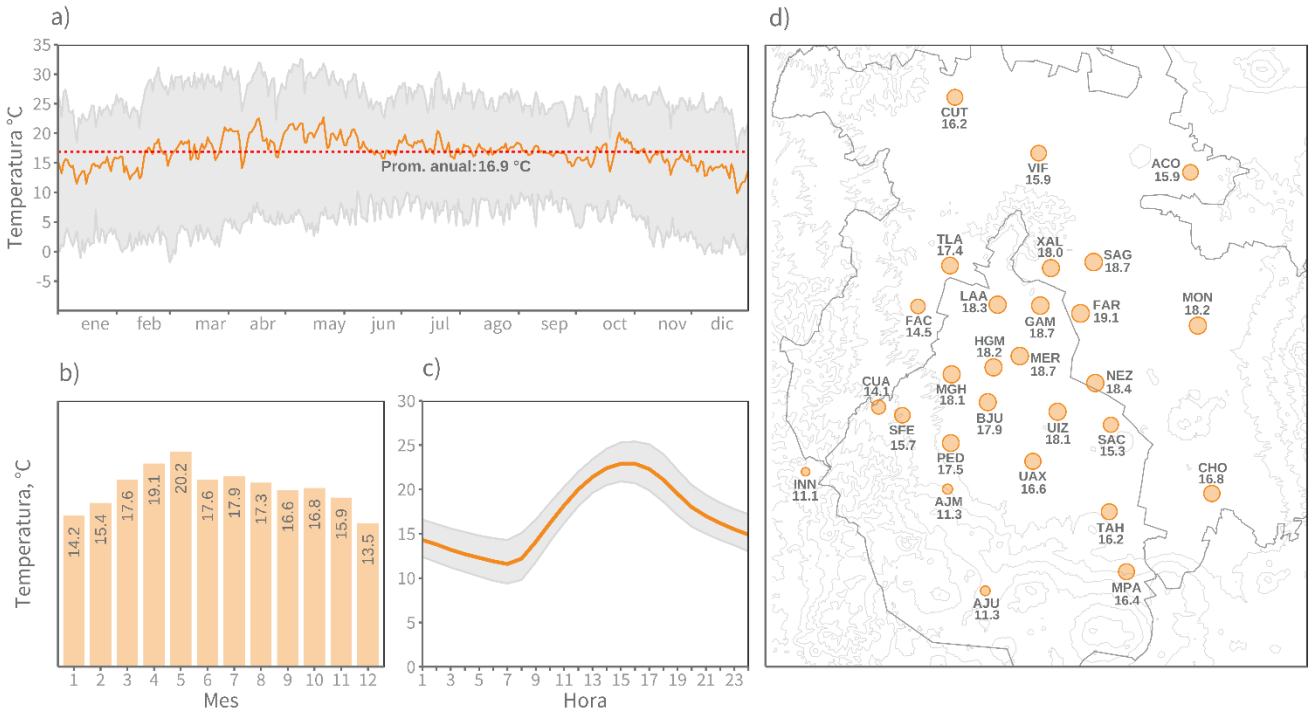


Figura 2.2. Comportamiento de la temperatura ambiente (°C) durante 2022. **a)** Serie de tiempo con el promedio diario (línea naranja continua), máximos y mínimos (sombreado gris), así como el promedio anual (línea roja punteada). **b)** Promedio mensual. **c)** Perfil horario, con el promedio por hora (línea naranja) y los cuantiles 25 y 75 (sombreado gris). **d)** Promedio anual por estación.

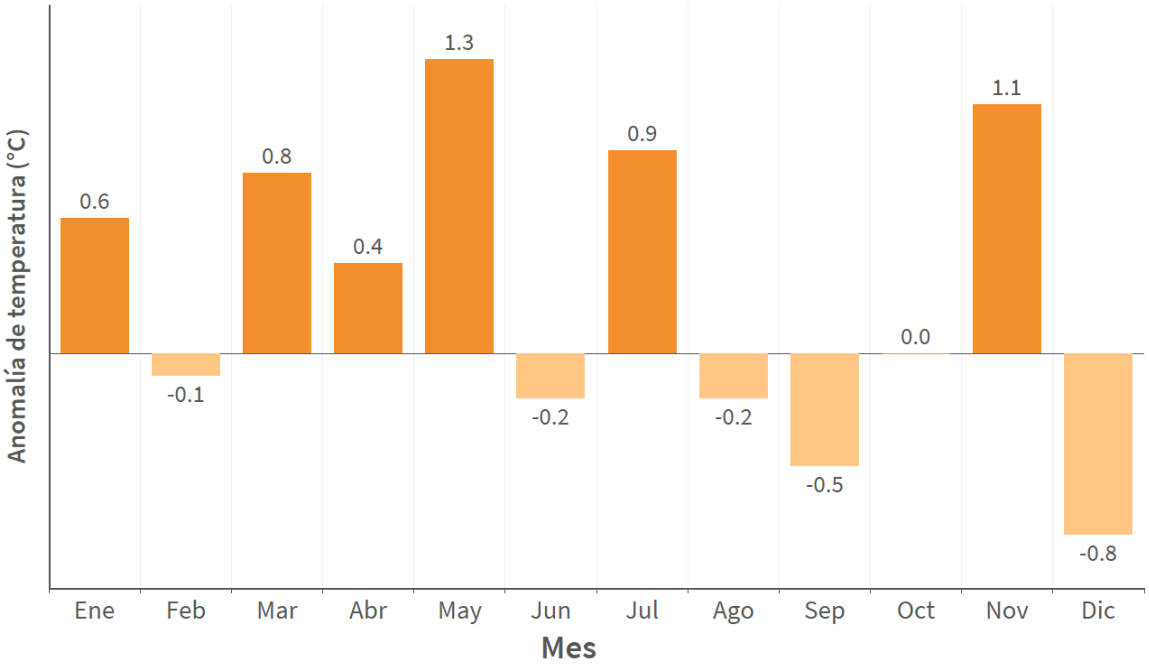


Figura 2.3. Anomalía de temperatura mensual con respecto al promedio de 12 años (2008-2019), calculada con las estaciones: TLA, FAC, VIF, MER, PED, TAH, XAL.

HUMEDAD RELATIVA (RH)

La humedad relativa (HR) es una medida de la cantidad de vapor de agua en la atmósfera, expresado en porcentaje (%). La humedad en la atmósfera disminuye con la latitud, desde el ecuador hacia los polos, este comportamiento se debe a la relación evaporación-precipitación y determina la caracterización de las regiones climáticas del planeta, entre secas y húmedas (Hartmann, 2015). El vapor de agua es un GEI, por lo que su monitoreo es importante para analizar la variabilidad climática y el calentamiento global actual. En calidad del aire, el vapor de agua en la atmósfera es un factor importante para la dispersión y distribución de contaminantes como el O_3, partículas menores a 10 micrómetros (PM_{10}) y partículas menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$); ya que, cuando la humedad aumenta, los contaminantes disminuyen, debido al lavado atmosférico ocasionado por la lluvia.

En México existen dos periodos climatológicos relacionados con la humedad y precipitación, que son ocasionados por factores sinópticos y de gran escala como las ondas tropicales, ciclones, el Monzón de Norteamérica y la posición de la Zona Intertropical de Convergencia (ZIC). Los dos periodos se clasifican en **seco**, de noviembre a abril y el **húmedo**, de mayo a octubre (Jáuregui, 1971). Durante 2022, en México se tuvo un comportamiento de humedad y precipitación dentro de lo normal, en comparación con la climatología (1991-2020). Desde enero a mayo de 2022 incrementó el porcentaje de sequías en el país; sin embargo, a partir de junio de 2022, con el inicio de la temporada de lluvias y de ciclones tropicales, se tuvo el aporte de humedad dos ciclones tropicales (Blas y Celia) en la cuenca del Pacífico, el paso de seis ondas tropicales y el Monzón de Norteamérica en el noroeste mexicano (SMN, 2022a).

Comportamiento de la HR en la ZMCM

La humedad relativa medida de REDMET tuvo un promedio anual de 53.2 % durante 2022(**Figura 2.4a**), este valor fue 0.3 % inferior al obtenido en 2021. Los meses más húmedos fueron de julio a octubre, dentro de la temporada de lluvias, con los máximos en agosto y septiembre, ambos con 65 %; mientras que, los meses más secos fueron de febrero a mayo, con el mínimo de 36 % en marzo (**Figura 2.4b**). En el perfil horario (**Figura 2.4c**) se observó que la HR aumentó desde la madrugada hasta las 07:00 h; después, desciende y alcanza su mínimo a las 15:00 h, más tarde, incrementa nuevamente. Este comportamiento de la HR es ocasionado por la relación inversamente proporcional con la temperatura y la radiación solar en el transcurso del día. El promedio anual por estación (**Figura 2.4d**) tuvo su máximo en AJU con 75.9 % y el mínimo fue en Miguel Hidalgo (MGH) con 45 %. Los máximos de HR en el sur, se asocian con la cercanía a las sierras Ajusco y las Cruces; mientras que los mínimos en el centro se deben a un mayor índice de evaporación con relación a la precipitación, intensificado por la urbanización.

La mayoría de las anomalías de HR en 2022 fueron negativas (contenido de humedad inferior a la media 2008-2019), excepto en enero, abril y diciembre, donde fueron positivas, pero poco significativas (0.7% a 1.2%). La mayor anomalía negativa fue de -12 % en mayo, seguida de -8.2 % en julio (**Figura 2.5**).

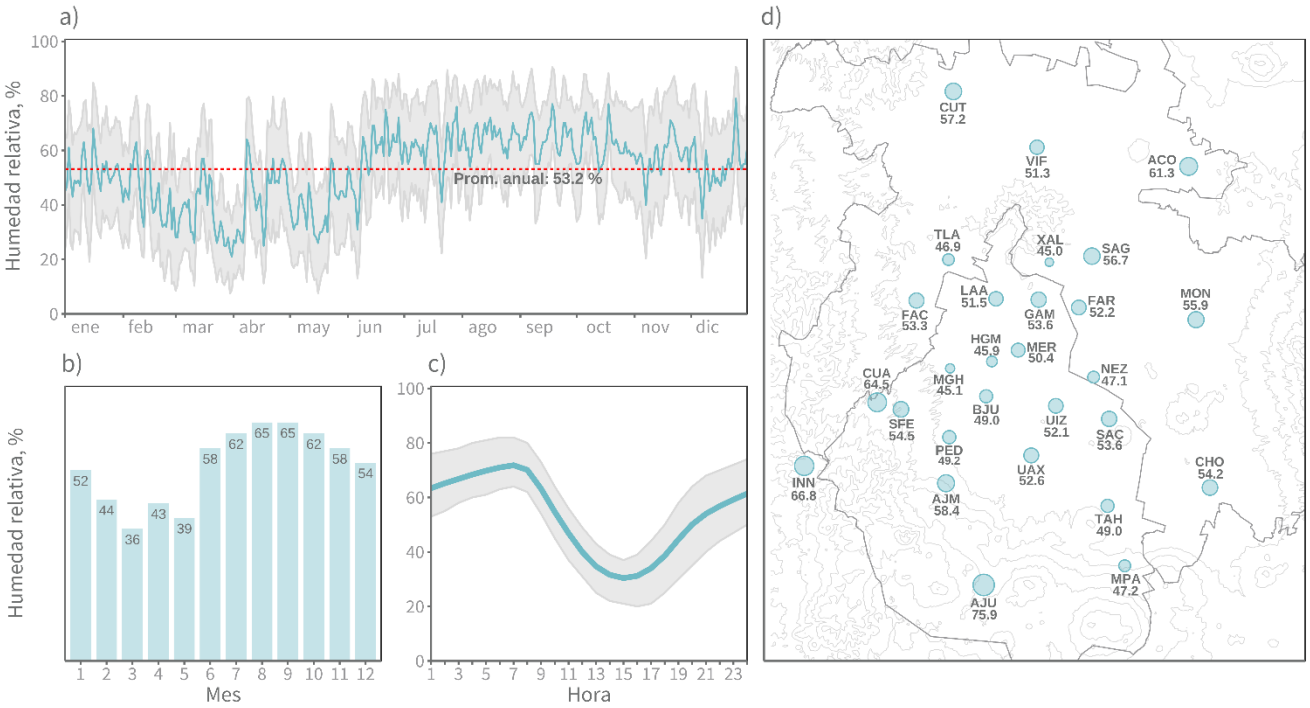


Figura 2.4. Comportamiento de la Humedad Relativa (%) durante 2022. **a)** Serie de tiempo con el promedio diario (línea azul continua), desviación estándar (sombreado gris) y promedio anual (línea roja punteada). **b)** Promedio mensual. **c)** Perfil horario, con el promedio por hora (línea azul) y los cuantiles 25 y 75 (sombreado gris). **d)** Promedio anual por estación.

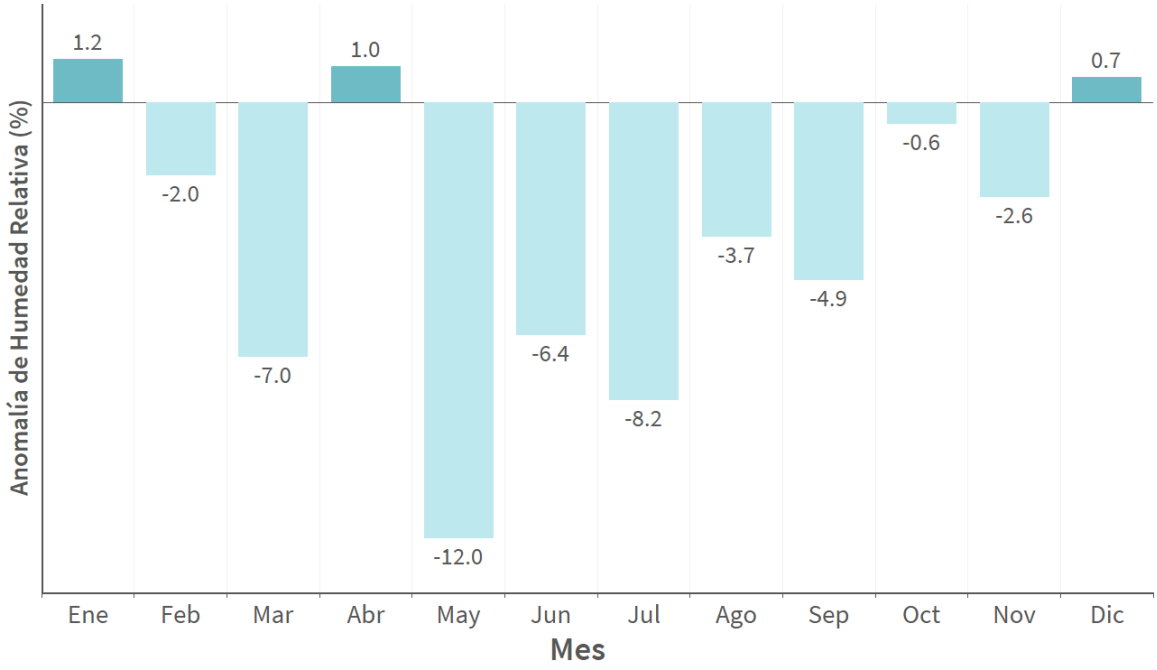


Figura 2.5. Anomalía de humedad relativa mensual con respecto al promedio de 12 años (2008-2019), calculada con las estaciones: TLA, FAC, VIF, MER, PED y XAL.

PRECIPITACIÓN

Todos los procesos atmosféricos en los que el agua (sólida, líquida o una combinación) cae a la superficie por acción de la gravedad, se le conoce como precipitación (AMS, 2021). La precipitación líquida se clasifica con base en el diámetro de la gota, en lluvia si es mayor a 0.5 mm y llovizna en el caso contrario. El comportamiento de la precipitación se asocia al de la humedad relativa, debido a que ambas variables están relacionadas con la cantidad de vapor de agua en la atmósfera.

El reporte climático anual del NCEI-NOAA, estimó que la precipitación promedio global en 2022 fue menor a la media climatológica de los últimos 40 años. Este comportamiento estuvo influenciado por "La Niña" (fenómeno ENSO en fase negativa), que ocasiona un enfriamiento en el Pacífico Ecuatorial. En general, se presentaron variaciones con respecto a la climatología, con precipitación mayor a lo normal en gran parte de Alaska, el centro-norte de Estados Unidos de América (EUA), el norte-este de Asia y el oriente de Australia; por el contrario, en el suroeste y centro-sur de EUA., el sur de Chile, el centro-norte de China y la mayor parte de Europa, tuvieron precipitación menor a lo normal (NOAA, 2023).

Las condiciones globales tuvieron una importante influencia en México, que durante 2022 presentó un promedio de precipitación acumulada de 743.4 mm, el cual fue ligeramente inferior a la media climatológica de 1991-2020 (747.6 mm); sin embargo, se clasificó como un año dentro de lo normal (SMN, 2023b). El mes más seco fue marzo, consistente con la climatología; por otro lado, agosto sí tuvo un comportamiento diferente a la media histórica y destacó como el más lluvioso, incluso más que septiembre, que frecuentemente es el que tiene mayor precipitación. El comportamiento en agosto estuvo influenciado por el Monzón de Norteamérica y el paso de ondas tropicales (SMN, 2023b).

De acuerdo con los datos registrados en el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), la precipitación acumulada mensual en el 2022 (**Figura 2.6**), tuvo los máximos en julio y agosto con 134 y 127 mm de lluvia, respectivamente; mientras que los mínimos se presentaron en febrero con 2 mm y enero con 5 mm. La alcaldía de la CDMX con el acumulado más alto de precipitación fue Magdalena Contreras con 978 mm y el mínimo se presentó en Tláhuac con 397 mm (**Figura 2.7**). Este patrón mensual y a nivel alcaldía es consistente con los años anteriores, en los que se ha observado que los máximos se presentan de junio a octubre y en las alcaldías en el suroeste, esto debido a la trayectoria de vientos y el entorno poco urbanizado cercano a zonas montañosas.

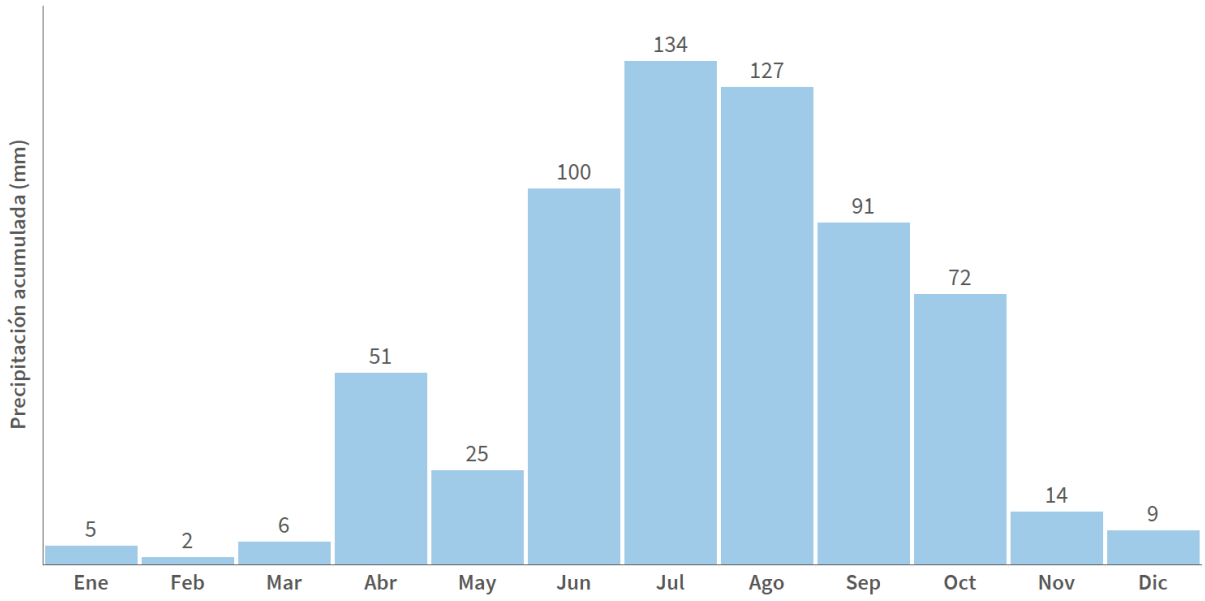


Figura 2.6. Distribución mensual de la precipitación acumulada en la CDMX, estimada con el promedio de la precipitación mensual acumulada de todas las estaciones del SACMEX.

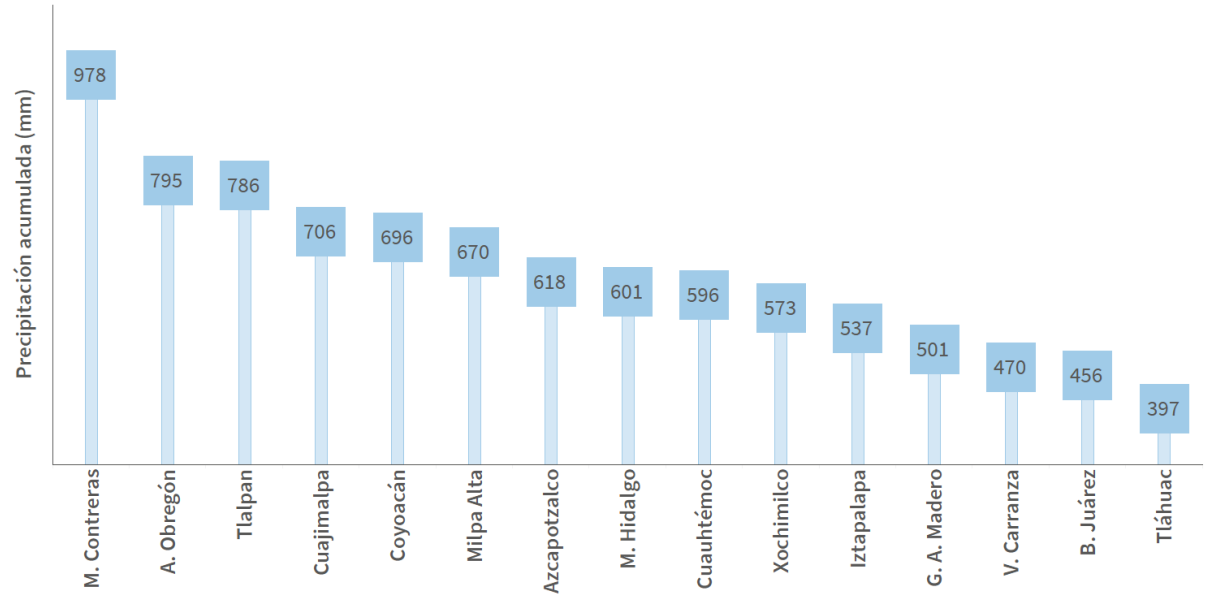


Figura 2.7. Precipitación acumulada por alcaldía de la CDMX, calculada como el promedio de la precipitación acumulada de todas las estaciones del SACMEX por alcaldía.

VIENTO

El viento es el movimiento del aire con respecto a la superficie terrestre y se estudia mediante dos variables: intensidad o velocidad y la dirección de donde proviene. El comportamiento de la velocidad y dirección del viento responde a factores atmosféricos a diferentes escalas, desde sinópticas hasta locales, por ejemplo, un pequeño remolino de pocos metros hasta una corriente en chorro en la altura (a 9-12 km sobre el nivel medio del mar) de miles de kilómetros. En la dinámica atmosférica, el comportamiento del viento responde a los cambios de la presión atmosférica, la densidad de la columna de aire, el gradiente de temperatura, la fricción con la superficie, entre otros (Hartmann, 2015).

Comportamiento del viento en la ZMCM

En 2022, la velocidad de viento promedio calculada con datos de REDMET fue de 2.1 m/s, similar al promedio de 2021 (**Figura 2.8a**). La velocidad de viento máxima fue 13 m/s y se registró el 22 de mayo a las 16:00 h en la estación Xalostoc (XAL). En el promedio mensual (**Figura 2.8b**), septiembre obtuvo el valor más alto del año con 2.47 m/s, seguido de mayo (2.45 m/s); mientras que los mínimos mensuales fueron en noviembre y diciembre, con 1.77 y 1.74 m/s, respectivamente.

El perfil horario de la velocidad de viento (**Figura 2.8c**) presentó los mínimos entre las 06:00 y 08:00 h, lo cual corresponde a las horas con más estabilidad atmosférica. En el transcurso del día, el calentamiento de la superficie genera gradientes térmicos, vertical y horizontalmente, lo que genera movimiento de las masas de aire, en consecuencia, se alcanzan los máximos de velocidad del viento de las 17:00 a 19:00 h, cuando los gradientes de temperatura, densidad y presión son máximos. En la distribución del promedio anual de la velocidad del viento (**Figura 2.8d**) se observó que el máximo fue 3.2 m/s en XAL, es importante mencionar que dicho sitio está influenciado por la altura del edificio en la que está ubicada. El mínimo anual se registró en la estación INN con 1.4 m/s.

En el análisis de las anomalías de la velocidad del viento (**Figura 2.9**), calculadas con respecto al período 2008-2019, fueron positivas en el primer semestre del año, así como en julio y septiembre, este último obtuvo la anomalía positiva máxima con 0.37 m/s. Esto pudo estar influenciado por "La Niña" (fase negativa ENOS), durante la cual se presentan vientos del este (Alisios) superiores a lo normal, en las capas bajas de la tropósfera sobre el Pacífico ecuatorial-oriental. En agosto y de octubre a diciembre, se presentaron anomalías negativas en el rango de -0.06 y -0.23 m/s.

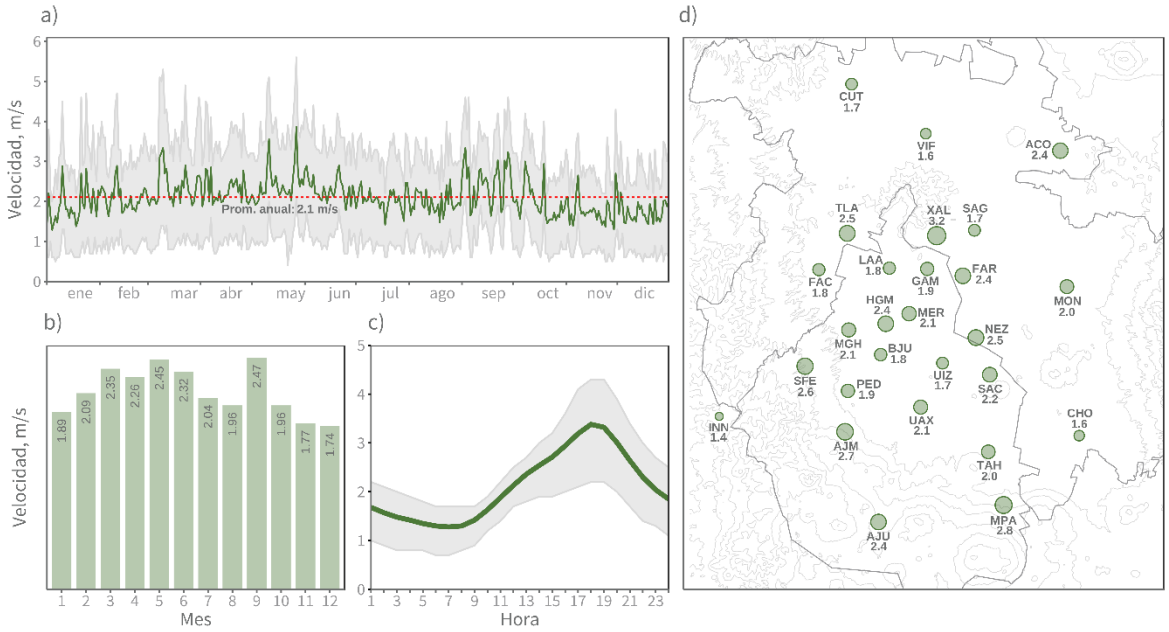


Figura 2.8. Comportamiento de la Velocidad de viento (m/s) durante 2022. **a)** Serie de tiempo con el promedio diario (línea verde continua), desviación estándar (sombreado gris) y promedio anual (línea roja punteada). **b)** Promedio mensual. **c)** Perfil horario, con el promedio por hora (línea verde) y los cuantiles 25 y 75 (sombreado gris). **d)** Promedio anual por estación.

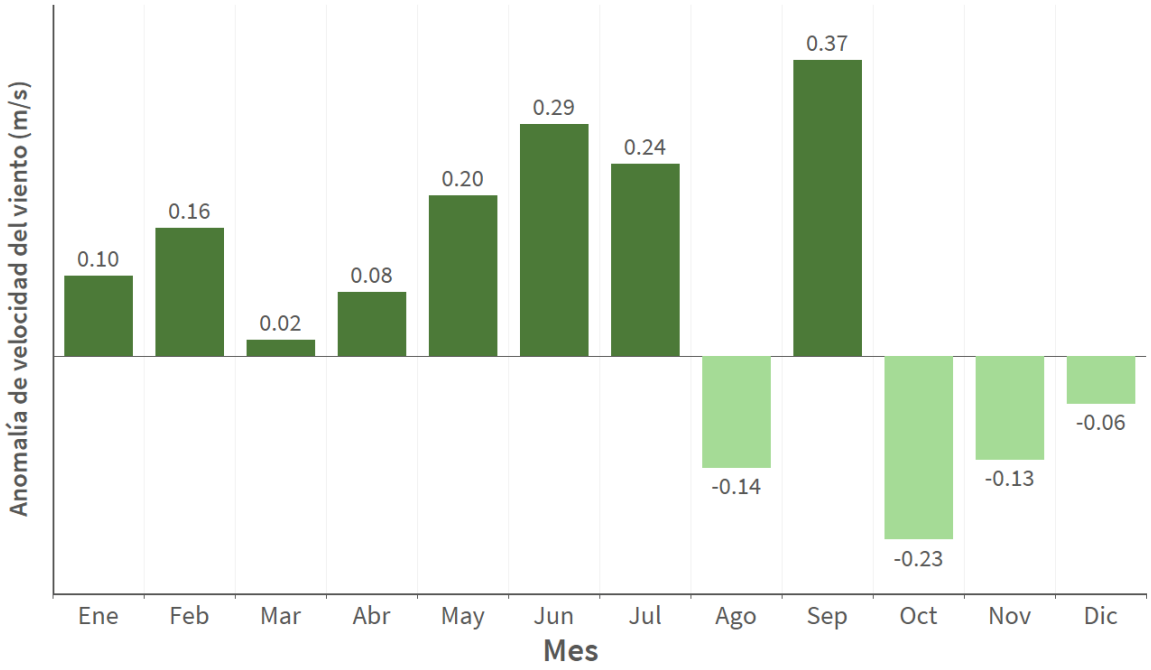


Figura 2.9. Anomalía de velocidad de viento mensual con respecto al promedio de 12 años (2008-2019), calculada con las estaciones: TLA, FAC, VIF, MER, PED y SAG.

La dirección de viento predominante durante 2022 (**Figura 2.10**), tuvo un patrón notable desde abril a noviembre, en estos meses los vientos fueron provenientes del norte hacia el sur de la ZMCM, mientras que de enero a marzo y en diciembre, el comportamiento fue más variable, con vientos desde el este-noreste hacia el sur, así como algunas corrientes del sureste hacia el centro, que ocasionaron zonas de confluencia del viento. El patrón de dirección del viento en 2022 fue consistente con los años anteriores, en los que predomina la dirección norte, esto favorece el transporte de contaminantes hacia las regiones del suroeste y sureste de la ZMCM.

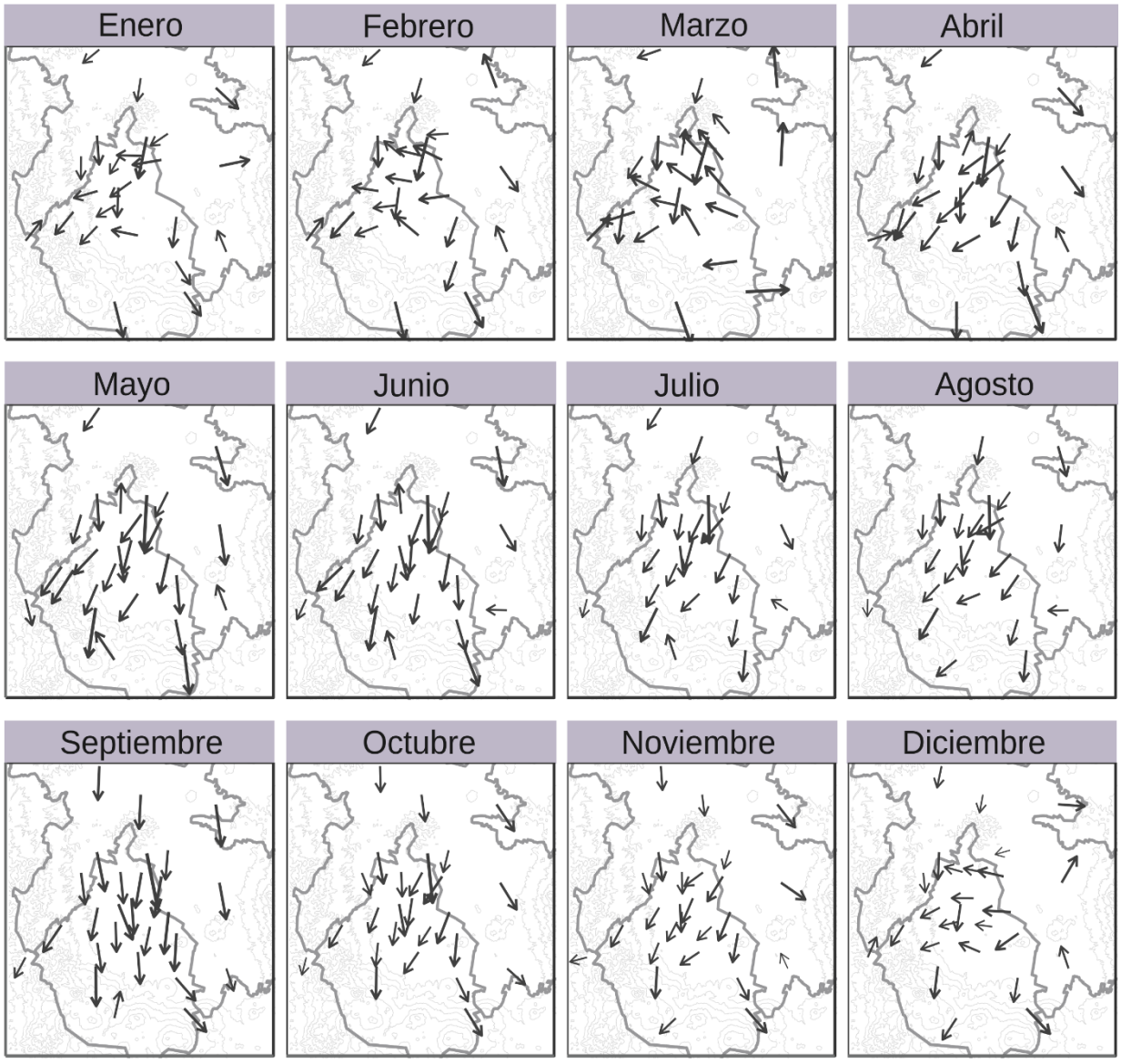


Figura 2.10. Comportamiento mensual de la dirección de viento durante 2022.

PRESIÓN ATMOSFÉRICA

La presión atmosférica se define como la fuerza ejercida por una columna de aire sobre un punto específico, ya sea a nivel del mar o en otra altitud (AMS, 2021). La presión se mide con un barómetro y se expresa en diferentes unidades como los hectopascales (hPa), milibares (mb), atmósferas (atm) y milímetros de mercurio (mmHg), entre otras. La conversión de estas unidades tiene la siguiente relación: 1 atm = 1013.25 hPa = 760 mmHg; la cual está basada en el valor promedio de la presión a nivel del mar. El análisis de la presión permite caracterizar diferentes sistemas meteorológicos, en núcleos de baja presión (ciclón tropical, ondas tropicales, canal de baja presión) o de alta presión (anticiclón, dorsal); la identificación de estos sistemas es importante para el diagnóstico y pronóstico de condiciones atmosféricas inestables (con nubosidad y precipitación) o estables (con cielos despejados, viento débil y baja probabilidad de lluvia).

Comportamiento de la presión atmosférica en la ZMCM

En la ZMCM, hay periodos con un incremento de la presión que ocasionan estabilidad atmosférica con viento débil, en consecuencia, se favorece el estancamiento de contaminantes; este comportamiento está influenciado por los sistemas de alta presión desarrollados a escala sinóptica. Estos periodos son frecuentes en las temporadas seca fría y seca cálida, que incluyen a los meses de diciembre a febrero y de marzo a mayo, respectivamente.

De acuerdo con los datos de REDMET, el 2022 tuvo una presión promedio de 584.7 mmHg (**Figura 2.11a**), que fue 0.2 mmHg inferior a la de 2021. Este promedio utiliza datos de las estaciones localizadas en la parte baja de la cuenca, debido a que la altura de los sitios influye en la medición de la presión. El comportamiento mensual (**Figura 2.11b**) tuvo ligeras variaciones durante el año, los máximos fueron en julio con 585.5 mmHg, seguido de enero con 585.2 mmHg; mientras que los mínimos fueron en abril y mayo con 583.9 y 584 mmHg, respectivamente. El perfil horario también tiene ligeras variaciones durante el día, con los valores más altos entre las 09:00 a 12:00 h y los mínimos de 15:00 a 18:00 h (**Figura 2.11c**).

En el análisis de anomalías de presión del 2022 (**Figura 2.12**) con respecto al promedio de 8 años (2012-2019), fueron positivas en la mayor parte del año, excepto en marzo, julio y agosto, los cuales presentaron anomalías negativas; mientras que el único que se comportó igual al período de comparación fue mayo. La anomalía positiva más alta se registró en octubre, la cual estuvo asociada a la presencia de un sistema anticiclónico sobre el centro de México (SMN, 2022b).

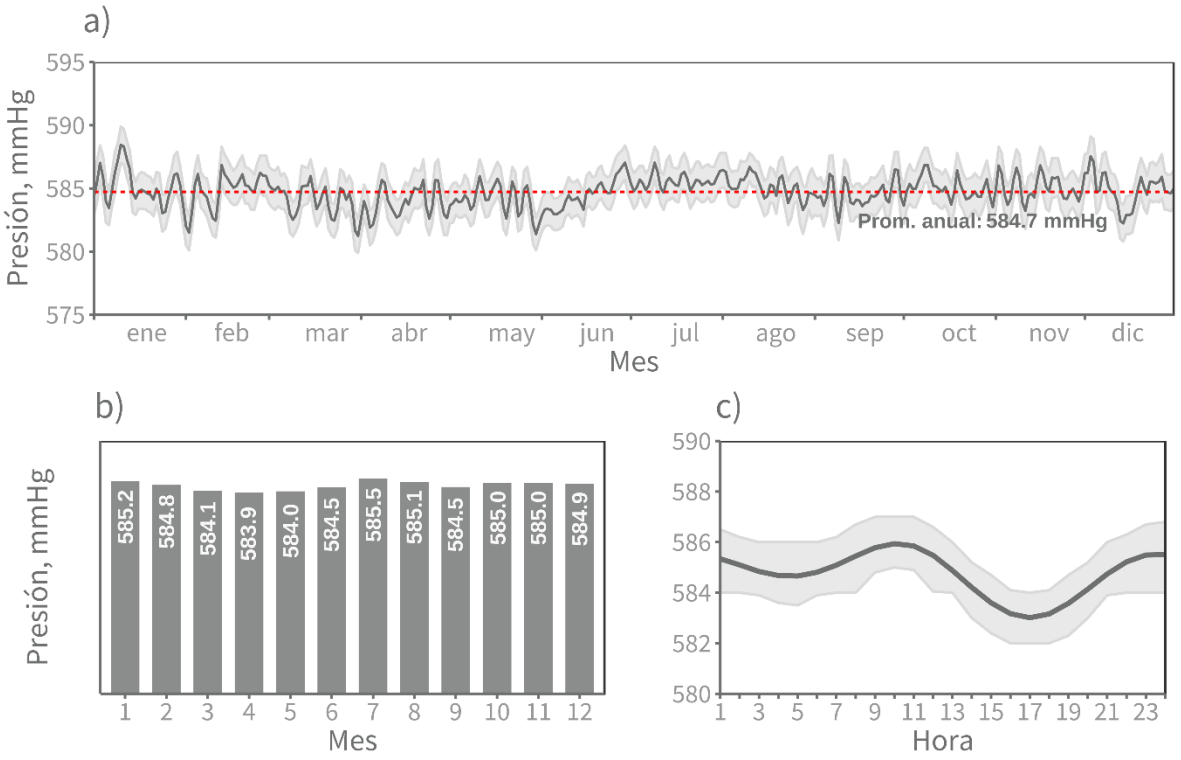


Figura 2.11. Comportamiento de la Presión (mmHg) durante 2022. **a)** Serie de tiempo con el promedio diario (línea gris continua), desviación estándar (sombreado gris) y promedio anual (línea roja punteada). **b)** Promedio mensual. **c)** Perfil horario, con el promedio por hora (línea naranja) y los cuantiles 25 y 75 (sombreado gris).

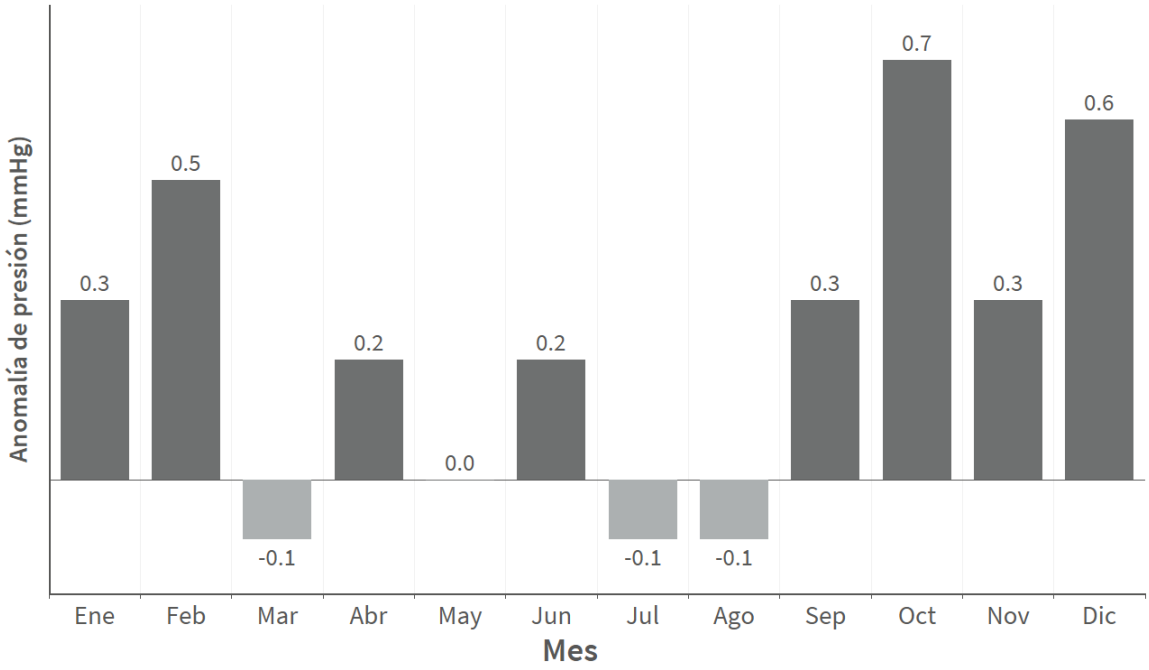


Figura 2.12. Anomalía de presión atmosférica mensual con respecto al promedio de 8 años (2012-2019), calculada con las estaciones: TLA, MER y LAA.

RADIACIÓN SOLAR ULTRAVIOLETA (UV)

El Sol emite ondas de energía que llegan a la Tierra como la **luz visible** que podemos observar (a través de colores rojo, azul, etc.), la **radiación infrarroja** que se percibe como calor y los **rayos ultravioletas** (**UV**), los cuales no se pueden observar ni sentir (U.S. EPA, 2024f). Los distintos rangos de la radiación solar desencadenan varios procesos físicos y biológicos, que son importantes para el equilibrio de los ecosistemas que conforman la variedad de climas y biodiversidad.

La radiación UV (100 a 400 nanómetros, nm) se divide en tres tipos (UV-A, UV-B y UV-C), que dependen de su longitud de onda dentro del espectro electromagnético y cada uno tiene diferentes características, así como efectos en la salud humana (**Tabla 2.1**). La intensidad de la radiación UV depende de varios factores como la elevación del sol, incidencia de la irradiación (directa o difusa), de la capacidad de reflejar la luz (nieve 50-80%; arena y láminas de aluminio 15-25%; agua en movimiento 20% y agua estancada 10%), de la capa de ozono, altitud, latitud, de la estación del año, hora del día y nubosidad (Collantes, 2015).

Tabla 2.1. Clasificación y características de la radiación UV

	Tipo de UV	Longitud de onda (nm)	Características
La radiación UV comprende las longitudes de onda desde 100 a 400 nm	**UV-A**	320-400	Representan el 98% de la radiación UV total. La mayor parte de los UV-A llegan a la superficie de la Tierra. **Efectos en la salud:** provocan el enrojecimiento y envejecimiento de la piel, así como daños oculares, pueden reducir la capacidad del organismo para combatir enfermedades. Contribuyen al riesgo de cáncer de piel.
	UV-B	290-320	Representan el 2% de la radiación UV total y tiene alta energía. La atmósfera terrestre absorbe la mayoría de los UV-B y su alcance depende de la latitud, altitud, época del año, entre otros factores. Los UV-B tienen fotones con energía suficiente para romper moléculas presentes en la atmósfera como ozono, dióxido de carbono, dióxido de nitrógeno, peróxido de hidrógeno, formaldehído, ácido nítrico, etc., por lo que están relacionados con la mayoría de los procesos fotoquímicos en la atmósfera terrestre (Valdés-Barrón et al., 2013). **Efectos en la salud:** provocan quemaduras solares, pigmentación, cáncer de piel, envejecimiento cutáneo y ceguera de las nieves (quemadura solar en la córnea que causa pérdida temporal de visión) y disminuyen la capacidad del organismo para combatir enfermedades. Una exposición excesiva a los rayos UV o las quemaduras solares frecuentes, pueden aumentar las probabilidades de desarrollar cáncer de piel.
	UV-C	100-290	Los rayos UV-C no llegan a la superficie de la Tierra porque son completamente absorbidos por la atmósfera. **Efectos en la salud:** los impactos nocivos de los rayos UV-C son mínimos.

1 nanómetro (nm) = 1.0×10^{-9} metros (m)

Comportamiento de la radiación UV en la ZMCM

En la CDMX, se reciben niveles altos de radiación solar debido a su latitud (19°40' N) y altitud (~2,240 msnm). La REDMET mide la intensidad de radiación solar en las unidades de Watt por metro cuadrado (W/m^2), para 2022 los promedios anuales de UV-A y UV-B fueron 1.777 y 0.077 W/m^2, respectivamente; en ambos tipos de radiación los máximos se presentaron de marzo a julio (**Figura 2.13a**). Como se mencionó, la intensidad de la radiación varía por época del año, lo cual es determinado por la declinación solar y en la CDMX, los máximos de la radiación UV-B y declinación solar fueron en el verano, mientras que los mínimos ocurrieron en el invierno (**Figura 2.13b**). El comportamiento horario de la radiación UV depende del ángulo de elevación solar, ya que incrementa con el ascenso del Sol y es máxima cuando éste alcanza el punto más alto en el cielo; en la CDMX esto sucede entre las 12:00 y 14:00 h (**Figura 2.13c**). Es importante mencionar que la radiación UV-B tiene menor magnitud que la UV-A; sin embargo, la radiación UV-B es más peligrosa aún en valores reducidos, debido a que es de mayor energía.

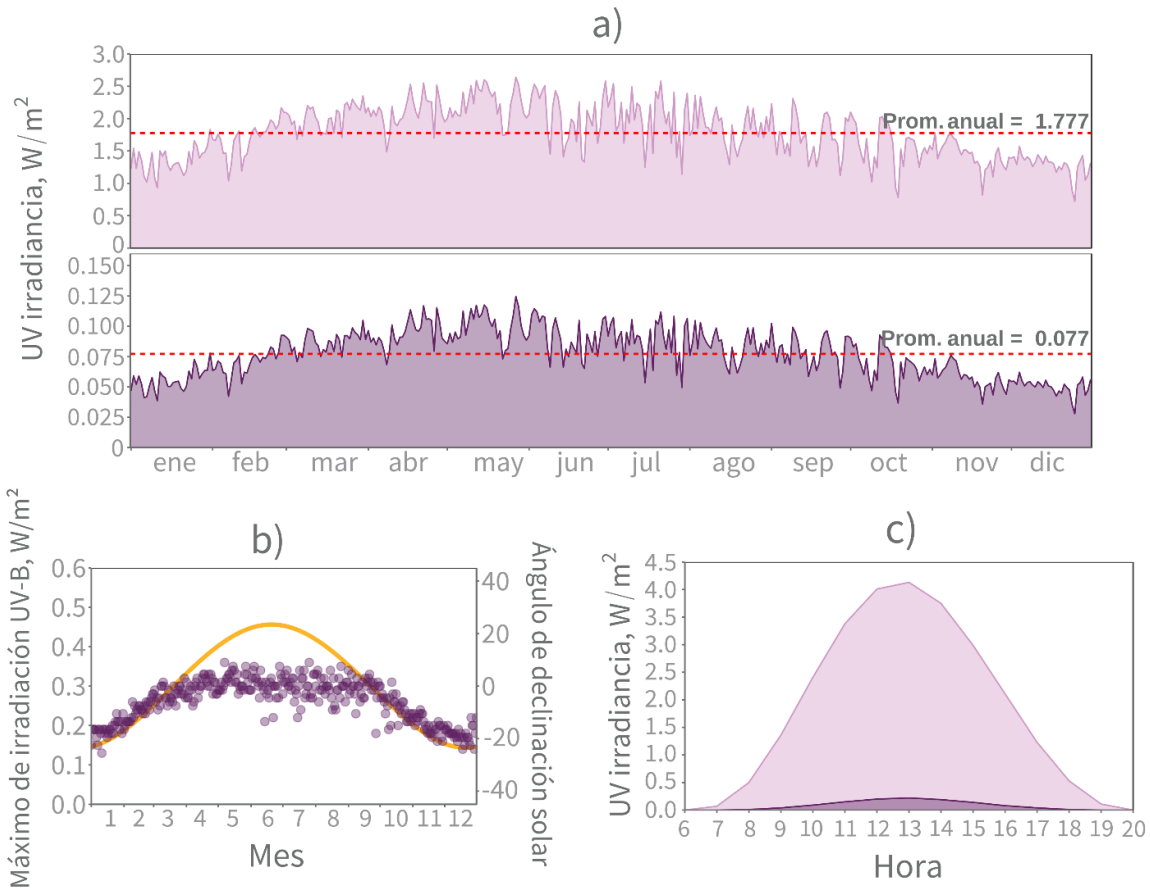


Figura 2.13. Comportamiento de la radiación UV durante 2022. **a)** Promedio diario de la irradiancia de UV-A (superior) y UV-B (inferior), entre las 06:00 y 20:00 h, la línea punteada es su promedio anual. **b)** Comparación de la intensidad máxima diaria de la radiación UV-B y el ángulo de declinación solar. **c)** Perfil horario de la radiación solar UV-A (morado claro) y UV-B (morado oscuro).

ÍNDICE DE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA (IUV)

Los rayos UV (A o B) penetran en la piel en función de su longitud de onda. Los UV-A llegan al interior de la dermis (capa profunda de la piel), por el contrario, los UV-B son absorbidos principalmente por la epidermis y tienen corto alcance en la dermis. Los UV-A generan especies reactivas de oxígeno que pueden dañar el ADN mediante reacciones indirectas, mientras que los UV-B son absorbidos directamente por el ADN, lo que provoca reordenamientos moleculares, estas modificaciones del ADN pueden ocasionar mutaciones y cáncer (D'Orazio et al., 2013).

Debido a los efectos dañinos de la radiación UV, se desarrolló el índice UV (IUV), el cual fue creado en 1992 por la oficina de Medio Ambiente de Canadá y, más tarde, fue estandarizado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2003. El IUV es una medida de la intensidad de la radiación UV solar en la superficie terrestre (OMS, 2003) y se expresa en una escala adimensional del 1 a 11+; en la que un valor alto significa mayor probabilidad de lesiones cutáneas y oculares, además que tardan menos tiempo en producirse. El IUV funciona como una herramienta para el cuidado de la salud, que tiene como objetivo informar a la población sobre los niveles de radiación UV, así como los riesgos de la exposición y las medidas que deben adoptar para protegerse.

En la ZMCM, el índice IUV se calcula con la intensidad de la radiación UV-B y se reporta cada 10 minutos con el objetivo de proporcionar información casi en tiempo real. En el análisis anual del IUV presentado en la siguiente sección, se calcularon promedios horarios y a partir de estos, se obtuvo el **valor diario máximo del índice**. La escala numérica, los colores y las recomendaciones utilizadas en la ZMCM, que sirven para comunicar la información sobre el IUV, provienen de la guía de la OMS publicada en 2003 (**Figura 2.14**).

Figura 2.14 Sistema de protección solar recomendado por la OMS. Fuente: Índice UV solar mundial (OMS, 2003).

Comportamiento del Índice UV en la ZMCM

Durante el 2022, el Índice UV máximo no tuvo días en la categoría Baja (IUV: 1 al 2) y para la Moderada (IUV: 3 al 5) sólo se presentaron 2 días, esto corresponde al 0.5 % del año. En las categorías Alta (IUV: 6 al 7) y Muy Alta (IUV: 8 al 10) se registraron 51 y 125 días, respectivamente; esto representó el 14 y 34 % del año en cada una de estas categorías (**Figura 2.15**).

El IUV Extremadamente Alto (11+) presentó mayor cantidad de días durante el año, con un total de 187, equivalente al 51 % del 2022. Los valores más altos, en promedio, fueron de marzo a septiembre, entre 11 y 11+; mientras que los mínimos se registraron durante enero, noviembre y diciembre, con promedios de 7 a 8; en el resto de los meses, febrero y octubre presentaron un IUV promedio de 9.

En la distribución mensual del número de días (**Figura 2.16**) se observó que los dos días con IUV Moderado ocurrieron en enero y diciembre; para los valores de categoría Alta, la mayoría se presentaron en diciembre (22 días) y enero (18 días), el resto se ocurrieron en noviembre con 9, así como en septiembre y octubre, ambos meses con 1 día. El IUV Muy Alto se presentó en casi todo el año (excepto en mayo), con mayor número de días en los meses febrero, octubre y noviembre con 26, 24 y 21 días, respectivamente.

La categoría de IUV Extremadamente Alto, se registró desde febrero (2 días) hasta octubre (6 días); sin embargo, el máximo de días fue en mayo, ya que en todo el mes se alcanzaron valores de IUV en esta categoría. Además, desde marzo a septiembre, la mayor parte de sus días registraron IUV de 11+, e incluso se alcanzaron valores de IUV = 13 durante este periodo. Estos valores máximos de IUV = 13 ocurrieron en abril con 9 días, durante mayo fueron 6, junio tuvo 5 días, septiembre registró 4 días con estos valores, julio y agosto, ambos con 3 días, finalmente, el mes de marzo que sólo tuvo un día con este nivel de IUV.

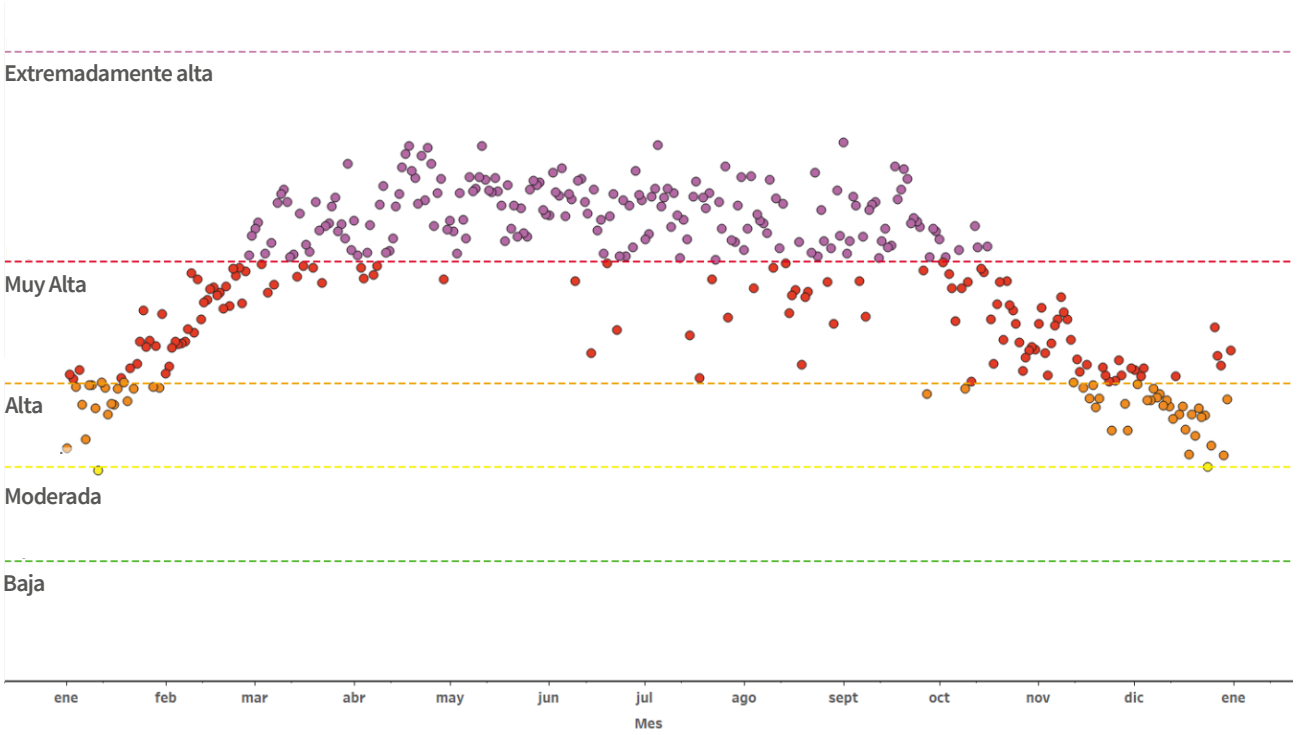


Figura 2.15. Comportamiento del Índice de Radiación Solar (IUV) máximo durante 2022.

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Ext. alta		2	24	25	31	26	27	20	26	6		
Muy alta	12	26	7	5		4	4	11	3	24	21	8
Alta	18								1	1	9	22
Moderada	1											1

Figura 2.16. Distribución mensual del Índice de Radiación Solar (IUV) máximo en 2022.

CAPÍTULO 3

Calidad del aire

Calidad del Aire

Ante la creciente crisis energética, los niveles récord de concentración de gases de efecto invernadero (GEI) y el aumento de fenómenos meteorológicos extremos, es importante analizar la relación entre el cambio climático[1] y la calidad del aire.

El cambio climático, causado por la acumulación de GEI en la atmósfera, se produce en una escala temporal de decenios a siglos, que ocasionan alteraciones ambientales en todo mundo. Por otro lado, la contaminación atmosférica se genera en la superficie de la Tierra, su escala temporal es de días a semanas y afecta a zonas concretas como las ciudades o regiones específicas como la Amazonía.

El cambio climático y la calidad del aire, aunque son conceptos diferentes, están interrelacionados, debido a que las especies químicas que los afectan están vinculadas. Las actividades antropogénicas que emiten GEI de vida larga, aumentan las concentraciones atmosféricas de las partículas y del ozono que son contaminantes de vida corta. Por ejemplo, la quema de combustibles fósiles, es una de las fuentes principales del GEI más relevante, el dióxido de carbono (CO_2), además se emite óxido nítrico (NO), que contribuye a la formación de ozono (O_3) y aerosoles de nitrato. Otras actividades como la agrícola, es una fuente importante de emisiones de metano (CH_4), uno de los GEI más potentes, así como amoníaco (NH_3) que forma aerosoles amonio. Los contaminantes atmosféricos afectan los ecosistemas a través de la deposición seca y húmeda, esto también vincula la calidad del aire con el clima. El depósito de nitrógeno, azufre y ozono tiene efectos negativos en los ecosistemas naturales, en los cuerpos de agua, la biodiversidad, la vegetación, el almacenamiento de carbono e inciden en el rendimiento de los cultivos de los sistemas agrícolas (OMM, 2023).

Los cambios en el clima pueden tener consecuencias en la calidad del aire local. El calentamiento atmosférico asociado con el cambio climático tiene el potencial de incrementar la producción del ozono a nivel del suelo, lo que conllevará a presentar desafíos para el cumplimiento de las regulaciones del ozono en el futuro. Las emisiones de contaminantes al aire pueden provocar alteraciones en el clima. A estos contaminantes, incluidos los GEI, se les suele denominar factores climáticos porque pueden ocasionar cambios en el clima. Por ejemplo, el O_3 calienta la atmósfera, mientras que algunos compuestos de las partículas pueden tener efectos variables en el clima, como el carbono negro, que procede de la combustión y contribuye al calentamiento, mientras que los sulfatos enfrían la atmósfera (U.S. EPA, 2024d).

[1] Cambios en las condiciones meteorológicas promedio que persisten durante varias décadas o más. El cambio climático engloba tanto los aumentos como los descensos de temperatura, así como los cambios en las precipitaciones, en el riesgo de determinados tipos de fenómenos meteorológicos graves y los cambios en otras características del sistema climático.

El conocimiento científico y herramientas desarrolladas por entidades ambientales como la U.S. EPA, aportan información para los tomadores de decisiones en los diferentes niveles de gobierno, con el objetivo de considerar al cambio climático dentro de la gestión de la calidad del aire, para mejorar y reducir los impactos en el clima (U.S. EPA, 2024e).

El impacto del cambio climático sobre los fenómenos meteorológicos se ha observado con mayor frecuencia, gravedad, duración y ubicación de éstos, por ejemplo, en el aumento de la temperatura, las lluvias torrenciales y sequías, además de otros fenómenos meteorológicos extremos (huracanes, olas de calor, etc.). Diversas regiones del mundo ya están experimentando fenómenos climáticos y meteorológicos como récords de temperaturas extremas, mayor intensidad de tormentas, alteración en los patrones de precipitación, inundaciones, entre otros, estos cambios probablemente tendrán impacto negativo en la salud humana. El cambio climático también afecta a la flora y fauna del planeta, lo que a su vez perjudica a la humanidad, por ejemplo, las zonas donde no había floraciones de algas tóxicas o enfermedades transmitidas por el agua, debido a que su temperatura era más fría, en un futuro probablemente tengan que afrontar estos peligros, a medida que la temperatura del agua incrementa y permite el crecimiento de microorganismos que son riesgos para la salud.

El impacto del cambio climático en la salud humana, se puede presentar de dos maneras: en primer lugar, **al aumentar la gravedad o la frecuencia de los problemas de salud** que ya están influenciados por factores climáticos o meteorológicos; y, en segundo lugar, al **crear problemas de salud o amenazas a la salud sin precedentes o imprevistos** en regiones donde no habían ocurrido anteriormente (USGCRP, 2016).

Existen ejemplos concretos de los efectos del cambio climático sobre la salud humana que ya se observan en el presente y que se pueden agravar en el futuro. Estos efectos pueden tener consecuencias a escala local, regional, nacional y global. La **Tabla 3.1** contiene la recopilación de algunos ejemplos de las alteraciones que causa el cambio climático, su efecto observable (segunda columna), la vía de exposición para la población (tercer columna), así como las consecuencias en salud (columna 4) y la última columna presenta los detalles del impacto en el clima, la cual muestra una idea más completa de la forma en la que el cambio climático afecta la salud y cómo los factores ambientales, institucionales, sociales y conductuales, tienen una función determinante en los resultados en salud (USGCRP, 2016).

Tabla 3.1. Ejemplos de los impactos del cambio climático en la salud humana.

En	Efecto climático	Exposición de las personas	Afectación en la salud	Impacto climático
Calor extremo	Presencia de fenómenos de calor extremo más frecuentes, graves y prolongados	Temperaturas elevadas	Enfermedades y muertes relacionadas con el calor	Al aumentar la temperatura esto provocará que aumenten las enfermedades y muertes relacionadas con el calor
Calidad del aire	Aumento de la temperatura y cambio en los patrones de precipitación	Mala calidad del aire de ozono, partículas y aumento en la concentración del polen	Muerte prematura, enfermedades cardiovasculares y respiratorias agudas y crónicas	Al aumentar la temperatura, los incendios forestales, la sequía, disminución en las precipitaciones, provocará el aumento del ozono, las partículas y contaminantes secundarios, con lo cual aumentan los riesgos de enfermedades cardiovasculares y respiratorias, así como incremento de riesgo de muertes por contaminación del aire
Inundaciones	Aumento del nivel del mar, de la frecuencia e intensidad de las precipitaciones, de los huracanes y de tormentas marítimas	Agua contaminada, escombros y alteraciones en la infraestructura de los servicios y habitacionales	Personas ahogadas, lesiones, afectación en la salud mental, enfermedades gastrointestinales, entre otras.	La presencia de inundaciones en la costa y en el interior de la tierra expone a la población a una gran cantidad de impactos negativos para la salud, antes, durante y después de los eventos
Infecciones por vectores	Presencia de temperaturas extremas y cambios en los patrones meteorológicos	Actividad de garrapatas y otro tipo de vectores en más estaciones del año y con mayor extensión geográfica	Enfermedad de Lyme, malaria, dengue, chikungunya, Zika, etc.	Las garrapatas y otros vectores mostrarán actividad estacional más temprana y una expansión de su territorio hacia el norte, con lo cual, aumenta el riesgo de la exposición humana a las bacterias o virus de enfermedades como Lyme, dengue, malaria, Zika, etc.
Agua contaminada	El aumento de la temperatura de la superficie marina, cambios en los patrones de precipitación y la escorrentía que afectan la salinidad costera	El agua de las áreas recreativas o los mariscos y pescados contaminados con *Vibrio vulnificus*	Diarrea y enfermedades intestinales inducidas por *Vibrio vulnificus*. Infecciones en las heridas y del torrente sanguíneo, puede causar la muerte	El aumento de la temperatura del agua es ideal para su presencia en el agua de mar incrementando el crecimiento de esta bacteria, con lo caula aumenta la exposición y el riesgo de enfermedades transmitidas por el agua
Alimentos contaminados	El aumento en la temperatura, humedad y duración en las diferentes estaciones del año	Incremento del crecimiento de los microorganismos patógenos, cambio de su presencia en las diferentes estaciones del año riesgo de exposición como a la *Salmonella*	Infección por *Salmonella*, brotes gastrointestinales	Con el aumento de la temperatura se incrementa la prevalencia de Salmonella en los alimentos, las estaciones más largas y los inviernos más cálidos intensifican el riesgo de exposición y de infección.
Salud mental y bienestar	Impacto del cambio climático, especialmente cuando el tiempo es extremo	Nivel de exposición a sucesos traumáticos como los desastres naturales	Sufrimiento, duelo, trastorno de la salud conductual, impactos sociales, resiliencia	Los cambios en la exposición a desastres naturales relacionados con el clima o mal tiempo causan o exacerban el estrés y las consecuencias para la salud mental, con un mayor riesgo para ciertas poblaciones vulnerables

El impacto del cambio climático sobre la calidad del aire genera preocupación y análisis del comportamiento de los contaminantes, los efectos más relevantes son:

- Los niveles de **ozono troposférico** se alteran debido a los efectos del cambio climático sobre los parámetros meteorológicos como la temperatura, lluvia, etc. Estos cambios dificultarán cualquier esfuerzo regulatorio para reducir la contaminación por ozono, debido a que son más frecuentes las condiciones meteorológicas adversas que favorecen la formación de este contaminante. Una estrategia para contrarrestar esto, sería aplicar reducciones notables y efectivas sobre las emisiones de los precursores del ozono, ya que las consecuencias del incremento en ozono significan mayor riesgo de muerte prematura, visitas hospitalarias, pérdida de días escolares y laborales, así como agravamiento de síntomas respiratorios y cardiacos.

- Se estima que **aumentará la frecuencia y severidad de los incendios forestales**, así como la intensidad de los que son provocados en la preparación de la tierra agrícola; esto como consecuencia de las sequias y altas temperaturas. Los incendios emiten cantidades importantes de partículas finas y precursores de ozono que, a su vez, aumentan el riesgo de muerte prematura y empeoramiento de enfermedades cardiovasculares y respiratorias.

- Se estima un **aumento en los casos de asma y enfermedades alérgicas**, debido a que el incremento de temperatura y CO_2, así como la alteración en los patrones de precipitación, contribuirán al aumento de algunos alérgenos en el aire y su permanencia en la atmósfera.

En el largo plazo, el comportamiento humano también puede cambiar, ya que se estima un aumento de la cantidad de energía eléctrica utilizada en todas sus actividades, esto modificaría las emisiones y, por lo tanto, tendría un efecto adverso en la calidad del aire (Bernard et al, 2001; Jacob & Winner, 2009).

En este capítulo se presenta el análisis del comportamiento de los contaminantes criterio gaseosos (dióxido de azufre, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y ozono), así como en partículas suspendidas (PM_{10}: diámetro menor a 10 micrómetros; $PM_{10\text{-}2.5}$: partículas gruesas y $PM_{2.5}$: finas, menores a 2.5 µm) medidos por las estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) para el 2022.

DIÓXIDO DE AZUFRE (SO_2)

El impacto del SO_2 sobre el clima es debido a las grandes erupciones de volcanes (**Figura 3.1**) que inyectan cantidades importantes de gases a la estratósfera, así como gotas de aerosol y ceniza, la cual cae rápidamente por acción de la gravedad y la mayoría se elimina en días o semanas, por lo que su impacto climático es menor. Los gases volcánicos como el SO_2 pueden provocar un enfriamiento global, mientras que el CO_2 volcánico, que es un GEI, tiene el potencial de calentamiento global en menor proporción que las emisiones antropogénicas. El mayor impacto del SO_2 volcánico es en la estratósfera, donde se convierte en ácido sulfúrico (H_2SO_4), que forma aerosoles de sulfato, los cuales aumentan la reflexión de la radiación solar hacia el espacio, en consecuencia, la capa cercana a la superficie (troposfera) se enfría (Volcano Active Foundation, 2024).

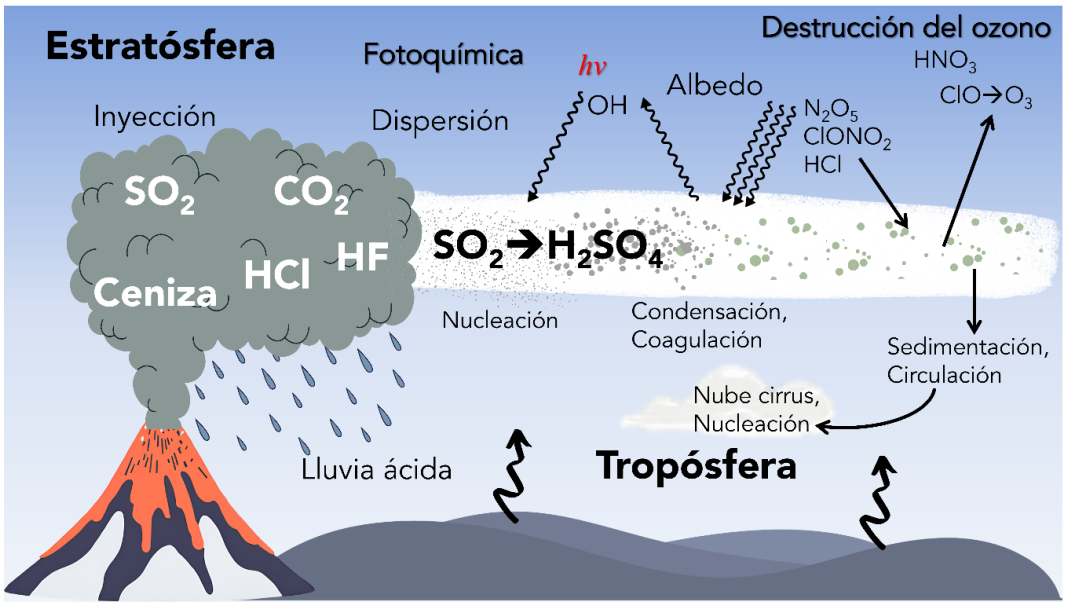


Figura 3.1. Reacciones de gases volcánicos en la atmósfera por varias vías (**Fuente**: Adaptado y traducido de USGS, dominio público).

En la ZMCM, el mayor impacto por SO_2 es debido a las emisiones del complejo industrial de Tula, donde se ubican una refinería y termoeléctrica, el cual se localiza a 70 km al noroeste de la ZMCM. En ocasiones, las exhalaciones del volcán Popocatépetl ubicado a 70 km al sureste de la ciudad, también afecta la concentración de SO_2; sin embargo, de acuerdo con B. de Foy, et al. (2009), que analizó varias plumas de SO_2 que impactaban la ZMCM, encontró que la mayoría provenían de Tula, especialmente las que tenían concentraciones más altas, y que el Popocatépetl tiene un efecto menor. Adicionalmente, estimó que hay días en que ambas fuentes contribuyeron a los niveles de SO_2 en la ZMCM, ya que se mezclaron en plumas altas y formaron sulfatos.

Durante 2022, el promedio anual de SO_2 fue 2.6 ppb, calculado con las estaciones que tuvieron suficiencia anual del 70 % o más, este valor es el mínimo histórico y representó una reducción del 10 % con respecto al 2021. En los sitios ubicados en la CDMX, la media anual fue 2.4 ppb, mientras que para los del EDOMEX fue 3.0 ppb, esto es debido a que en el norte se registran las concentraciones más altas por la cercanía con Tula y conforme se mueve la masa de aire contaminado con la trayectoria del viento, se presentan procesos de transformación, deposición y dilución, que disminuyen gradualmente la concentración del SO_2, en consecuencia, los niveles en el sur son menores (**Figura 3.2a**). En el análisis por estación, promedio anual máximo fue 4.9 ppb y se registró en Tlalnepantla (TLA) en EDOMEX. En el promedio diario (24 h), el valor más alto fue 36 ppb, observado el 14 de febrero en la estación Villa de las Flores (VIF), en el municipio de Coacalco, EDOMEX; mientras que el máximo horario fue 150 ppb, registrado en la estación VIF durante el 1 de abril.

En la serie de tiempo del SO_2 (**Figura 3.2b**) se observó que el promedio horario presentó valores altos en los primeros meses del año, esto ocurre debido a las condiciones meteorológicas de la temporada seca fría y una mayor frecuencia de inversiones térmica. Normalmente, de mayo a octubre se registran los valores mínimos, debido a la altura de la capa límite en los meses de seca caliente y a la temporada de lluvia donde se presenta el lavado atmosférico, en el que ocurre la reacción del SO_2 con el agua que genera la lluvia ácida; la descripción de este fenómeno se puede consultar en el **capítulo 6** de este informe anual.

El perfil horario del contaminante indica concentraciones elevadas en la madrugada con mayor impacto en sitios como VIF, TLA y Atizapán (ATI), relacionados al transporte regional desde el complejo industrial de Tula; también se presenta un pico en la mañana, entre las 08:00 y las 10:00 h, el cual se asocia con el tránsito vehicular (**Figura 3.2c**). El transporte regional del SO_2 ocurre principalmente en la noche, debido a que la capa límite atmosférica es más estable y con viento débil proveniente del norte, por lo que la masa de aire contaminada se mantiene cerca de la superficie, en consecuencia, los niveles altos de SO_2 se registran en el norte de la ZMCM y durante la mañana.

En el comportamiento mensual del SO_2 se observó que los máximos fueron en febrero y los mínimos en septiembre, lo que es congruente con el comportamiento histórico (1988-2021); sin embargo, la magnitud de los valores se ha reducido considerablemente, ya que en 2022, los máximos fueron 4 ppb para febrero, marzo con 3.5 ppb y octubre con 3.2 ppb; mientras que los promedios históricos de enero, diciembre y febrero fueron 15.6, 15.1 y 14.1 ppb, respectivamente (**Figura 3.2d**).

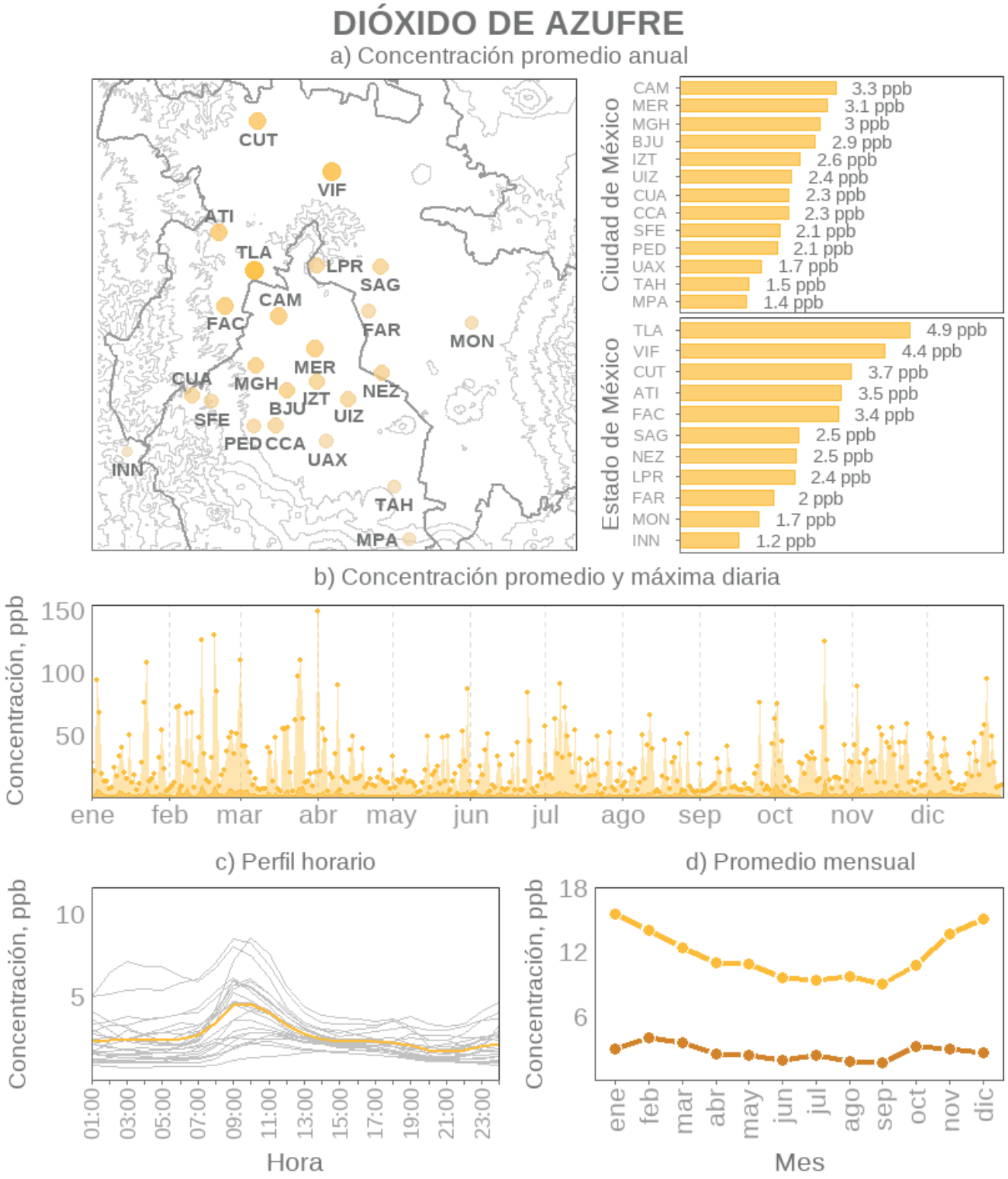


Figura 3.2. a) Promedio anual de SO_2 por sitio de monitoreo. En el mapa (izquierda), el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del promedio anual y las gráficas de barras (derecha) corresponden al promedio anual dividido por entidad. **b)** Serie de tiempo del promedio diario (área en amarillo oscuro) y el máximo horario por día (puntos y área sombreada clara). **c)** Perfil horario del promedio de todas las estaciones (línea amarilla) y por sitio (líneas grises). **d)** Promedio mensual del 2022 (línea oscura) y datos históricos de 1988 a 2021 (línea clara).

En el análisis del promedio mensual por estación de la **Figura 3.3,** se observó que los valores más altos en tonos amarillo intenso, se registran durante el invierno y febrero. Durante la temporada de lluvia, las concentraciones del SO_2 disminuyen significativamente, siendo septiembre el mes que reporta los valores más bajos .

		ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sept	oct	nov	dic
Ciudad de México	CAM	4.8	5.2	4.7	3.4	3.1	1.8	2.6	2.0	1.7	4.1	3.9	2.8
	MER	3.8	5.0	4.3	2.7	3.1	2.0	2.7	1.9	1.6	3.7	3.3	3.7
	MGH	3.6	4.3	3.8	2.5	2.6	2.0	2.4	1.9	1.7	4.0	4.1	3.3
	IZT	2.9	4.2	3.9	2.1	2.2	1.8	2.0	1.5	1.6	4.3		2.3
	BJU	2.8	3.9	3.8	2.9	2.5	2.2	2.5	1.9	1.5	3.5	3.8	3.2
	UIZ	2.3	3.6	3.2	1.8	2.3	1.6	1.9	1.6	1.6	3.7	2.8	2.3
	CCA	2.4	3.4	2.4	1.7	2.2	2.1	2.8	1.7	2.2	3.4	2.3	1.3
	PED	2.2	3.1	2.2	1.9	1.8	1.6	2.1	1.5	1.4	2.5	2.4	1.7
	SFE	2.4	2.9	2.3	1.9	2.0	1.9	2.1	1.7	1.8	2.8		
	CUA	2.3	2.8	2.1	1.9	1.7	1.7	2.1	2.5	1.9	3.1	3.4	2.5
	UAX	1.6	2.3	2.4	1.5	1.6	1.4	1.6	1.4	1.2	1.8	2.1	1.7
	MPA	3.0	1.5	1.9	1.1	1.4	1.1	0.9	1.1	1.1	1.4	1.7	1.6
	TAH	1.6	1.5	1.8	1.5	1.4	1.5	1.1	1.3	1.4	2.0	1.5	1.1
Estado de México	VIF	4.4	7.4	6.1	5.2	3.4	3.1	4.1	2.7	1.5	5.6	5.2	4.7
	TLA	5.5	6.0	5.5	4.8	4.3	3.7	5.1	4.0	3.2	6.7	5.9	4.8
	ATI	2.0	6.0	4.6	2.4	2.5	2.0	3.6	2.8	2.7	4.5	4.1	3.7
	FAC	3.9	5.8	4.4	2.8	2.9	2.3	3.3	2.4	1.4	3.8	4.3	3.9
	CUT	3.1	5.3	4.1	2.9	3.4	2.5	4.7	3.2	1.5	4.7	4.6	4.5
	LPR	3.2	4.1	2.9	2.1	2.3	1.8	2.0	1.6	1.3	2.2	3.1	2.6
	NEZ	2.5	3.3	3.5	3.2	2.4	1.4	1.9	1.5	1.0	3.0	2.8	2.6
	FAR	1.9	2.8	2.9	2.1	2.1	1.7	1.3	1.5	1.2	2.4	1.9	1.9
	MON	1.9	2.2	2.0	1.8	1.9	1.0	1.3	1.4	1.2	2.2	1.6	1.7
	INN	1.6	1.3	1.5	1.2	1.5	1.3	1.2	1.2	1.0	1.4	0.9	0.9
	SAG				2.8	2.3	2.1	2.7	1.8	1.4	3.3	3.1	3.2

Figura 3.3. Promedio mensual de la concentración de SO_2 por estación de monitoreo. Los espacios grises indican periodos sin datos o datos insuficientes.

ÓXIDOS DE NITRÓGENO

Los óxidos de nitrógeno (NOx) tiene dos gases principales: óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO_2). En general, el término NOx se refiere a la combinación de dichos gases debido a la inter conversión mutua que presentan en presencia de oxígeno. Sin embargo, los NOx tienen en compuestos traza: óxido nitroso (N_2O), dióxido de di nitrógeno (N_2O_2), anhídrido nitroso (N_2O_3), tetróxido de nitrógeno (N_2O_4) y anhídrido nítrico (N_2O_5).

El nitrógeno molecular (N_2) y el óxido nitroso (N_2O) son prácticamente inertes en la troposfera, mientras que las especies de **nitrógeno reactivo** (**Nr**), que incluye óxidos de nitrógeno (NOx= NO+NO_2), iones nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+), el amoníaco (NH_3) y compuestos orgánicos con nitrógeno, como el nitrato de peroxiacilo, también llamado PAN ($C_2H_3NO_5$), las cuales interactúan con otras especies para generar ozono (O_3) y material particulado (PM, p. ej. nitrato de amonio: NH_4NO_3). Estas reacciones químicas y los contaminantes resultantes son influenciadas por las variables meteorológicas como la precipitación, velocidad del viento, altura de la capa límite atmosférica y la radiación solar; que, junto con las emisiones, hacen que el ciclo del nitrógeno sea importante en las interacciones del cambio climático, la calidad del aire y en la salud humana. Estas interacciones de los compuestos del Nr se presentan en la **Figura 3.4,** en la que se observa la interrelación con cambio climático (en *rojo*), en el ambiente (*verde*), en los niveles de contaminación, así como en la exposición humana y los efectos adversos sobre la salud humana (*azul*). Los efectos sobre la salud estarán influenciados por factores de susceptibilidad y vulnerabilidad (*morado).*

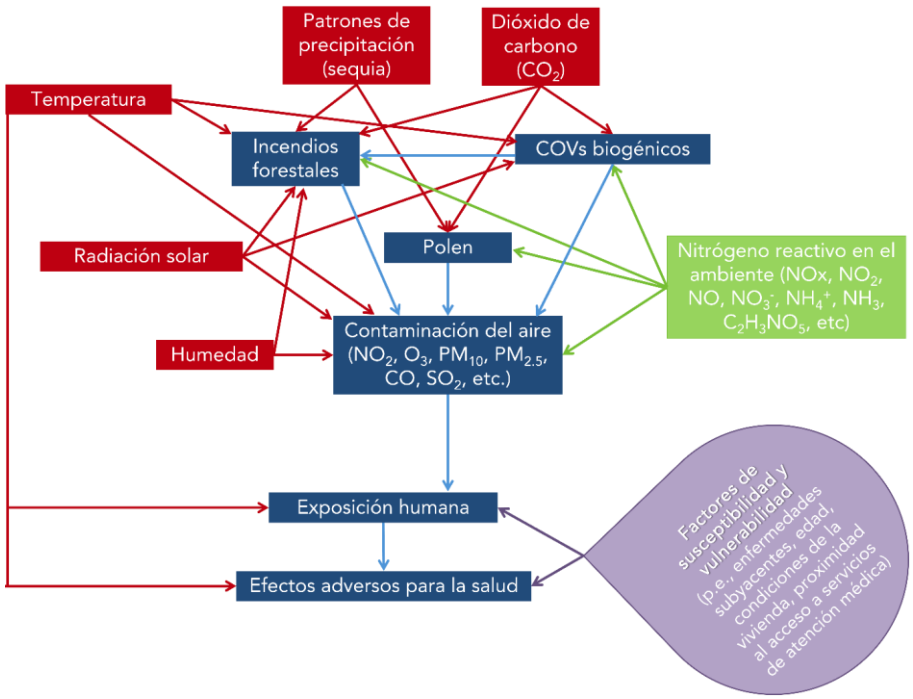


Figura 3.4. Interacciones de los Nr con el cambio climático, la calidad del aire y los impactos en la salud humana (**Fuente**: Adaptado de Peel, et al. 2013).

Las consecuencias más importantes ocasionadas por las interacciones de los Nr se pueden observar en un incremento de días con niveles altos de ozono, una mayor duración de la temporada de ozono, aumento de las emisiones de COV provenientes de la vegetación, más cantidad de polen e incremento de las emisiones de partículas, NOx y COV, ocasionados por una mayor frecuencia de incendios forestales. Dichas interacciones del cambio climático y los Nr pueden tener implicaciones en las políticas ambientales, especialmente en el cumplimiento de los estándares de los contaminantes atmosféricos, que aun con medidas de reducción en emisiones, se pronostica que la contaminación del aire puede empeorar debido a la "penalización climática"[2]. En consecuencia, en un mundo más cálido, la reducción de NOx puede resultar en una menor mitigación del O_3, de hecho, el cambio climático por sí solo puede empeorar significativamente la gravedad y la frecuencia de los eventos con altos niveles de O_3 (Peel, et al, 2013). Debido a esto, es necesario el desarrollo de investigación para evaluar la interacción de la contaminación del aire con el cambio climático de los últimos años, así como las consecuencias en la salud humana (Peel, et al., 2013; Suddick, et al, 2012).

En la **Tabla 3.2** se resumen algunos escenarios en los cuales el cambio climático y los compuestos Nr pueden interactuar con el aumento de contaminantes atmosféricos y el impacto negativo en la salud (Peel, et al, 2013). La especie más importante de los Nr en el cambio climático es el óxido nitroso (N_2O), debido a que es un compuesto de larga vida y su permanencia promedio en la atmósfera es de 114 años. El N_2O es el tercer GEI más relevante, después de CO_2 y metano (CH_4); tiene un alto potencial de calentamiento global (GWP), ya que un kilogramo de N_2O equivale a casi 300 veces el GWP del CO_2, además tiene la capacidad de agotar la capa de ozono estratosférico. El N_2O está relacionado con el uso de fertilizantes nitrogenados sintéticos y de combustibles fósiles, por lo que han aumentado su presencia en el aire y agua.

Estos cambios han alterado el ciclo del nitrógeno y las especies de Nr, así como al sistema climático global. Se estima que el 40 % del total de emisiones de N_2O provienen de actividades antropogénicas, como la agricultura, transporte e industria, combustión, residuos; además tiene fuentes naturales, especialmente aquellas que están asociadas al ciclo del nitrógeno, es decir, el nitrógeno en la atmósfera, las plantas, animales y microorganismos en el planeta (Suddick, et al., 2012). El N_2O se elimina de la atmósfera cuando es absorbido por bacterias o destruido por la radiación ultravioleta y reacciones químicas. (Aryal, et al., 2022; US-EPA, 2024e).

[2] La penalización climática se refiere específicamente al aumento del cambio climático en su impacto en el aire que respiran las personas

Tabla 3.2. Ejemplos de la interacción entre el cambio climático y el nitrógeno reactivo (Nr), su un impacto sobre los contaminantes del aire y efecto en la salud.

Consecuencias	Impacto en la calidad del aire	Impacto en la exposición humana	Impacto neto en la salud humana (- adverso, + positivo)	Nivel de confianza (1 alto y 3 menor)
Incremento de estabilidad atmosférica	Incremento de ozono ("penalidad climática") y de la sensibilidad del O_3 a las emisiones de NOx	Incremento en la exposición a ozono	—	1
Más crecimiento en la vegetación debido al aumento de CO_2 y Nr	Más emisiones biogénicas de COV y emisiones por incendios forestales	Aumento de la exposición a O_3, polen y PM (incluyendo AOS*)	—	1
Mayor frecuencia de incendios forestales debido a la sequía y altas temperatura	Incremento de emisiones biogénicas de COV, PM y NOx	Mayor exposición a NOx, O_3 y PM	—	1
Incremento de la humedad absoluta	Aumento del radical OH, atenuación en el transporte a larga distancia del O_3, mayor tasa de formación de SO_4^- y NO_3^-	El decremento en el transporte del O_3 puede conllevar a una mayor formación del O_3 local	±	3
Altas temperaturas	Decremento o incremento de la formación del NO_3^- y NH_4^+	Variabilidad en la exposición a partículas	±	3
Más eventos extremos de O_3 y de temperaturas	Eventos de alerta o contingencia por O_3	Mayor exposición por niveles altos de temperaturas y O_3	—	3
Modificación en los patrones de precipitación: inundaciones y/o sequías	La precipitación disminuye los contaminantes primarios y la nubosidad reduce la formación de los secundarios. La sequía incrementa la presencia de contaminantes	En la temporada de lluvias hay disminución de PM, CO, NOx. En las sequías hay aumento de O_3, PM, aerosoles, etc.	+	3

* PM materia particulado o partículas en general; AOS. Aerosoles orgánicos secundarios

En la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), de acuerdo con el inventario de emisiones del 2020, se estima que se emiten 1,975 toneladas al año de N_2O, de las cuales 975.86 provienen de fuentes móviles, 871.68 corresponden a fuentes de área y 127.02 a fuentes puntuales. En la **Figura 3.5**, se observa la distribución por tipo de fuente y de las categorías emisoras con una contribución igual o superior al 3.0 % de las emisiones totales (SEDEMA, 2023b). El N_2O es un

compuesto dentro del grupo de los NOx, pero tiene un comportamiento diferente al resto (ATSDR, 2014). En la ZMVM es importante reducir las emisiones de todos los NOx, especialmente en fuentes móviles ya que contribuyen con la mitad de las emisiones de NOx.

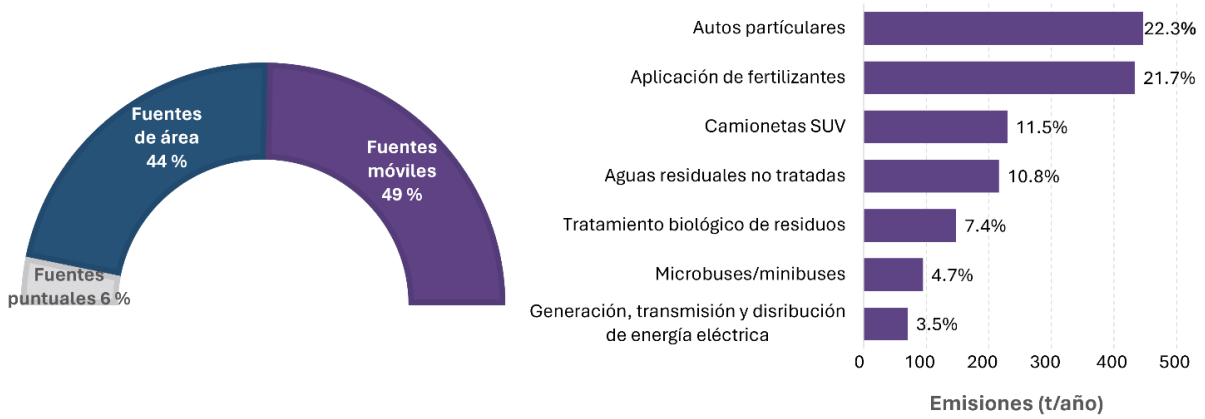


Figura 3.5. Emisiones del óxido nitroso (N_2O), por fuente y categoría en la ZMVM, 2020. **Fuente**: Inventario de Emisiones de la ZMVM 2020 (SEDEMA, 2023).

En el análisis de los óxidos de nitrógeno en 2022, el promedio anual para óxido nítrico (NO) fue 12 ppb, en dióxido de nitrógeno (NO_2) fue 22 ppb y el total de óxidos de nitrógeno (NOx) fue 34 ppb. Estos valores fueron prácticamente iguales al 2021, con una variación de 1 ppb entre el NO y NO_2. Los promedios anuales por entidad federativa, para los sitios ubicados en la CDMX fueron 11, 23 y 34 ppb para NO, NO_2 y NOx, respectivamente; en comparación con 2021, fue un decremento de 1 ppb en NO y 1 ppb de incremento para NO_2. En EDOMEX no hubo variación, ya que la concentración fue igual al 2021, para NO (14 ppb), NO_2 (20 ppb) y NOx (40 ppb). Este patrón es debido a que los sitios cercanos a vialidades con alto tránsito vehicular (p. ej. MER, TLA, CAM y MGH) tienen mayores concentraciones porque la fuente principal de emisiones de estos compuestos son los vehículos (**Figuras 3.6a, 3.7a y 3.8a**). Los niveles han disminuido gradualmente en los últimos años; sin embargo, la concentración horaria de NOx supera 400 ppb en algunas estaciones que están influenciadas por las emisiones vehiculares y condiciones meteorológicas adversas, como inversiones térmicas que provocan estancamiento de los contaminantes.

El máximo horario de NOx fue 435 ppb y se registró el 6 de diciembre en el sitio Chalco (CHO) en EDOMEX. En NO_2, el promedio horario más alto fue 131 ppb en Camarones (CAM) en la CDMX, durante el 7 de diciembre. Los tres contaminantes (NO, NO_2 y NOx) tienen un patrón estacional, con mayor concentración en la temporada seca-fría (noviembre a febrero), ocasionado por condiciones de estabilidad atmosférica, disminución de la capa de mezcla, así como mayor frecuencia e intensidad de inversiones térmicas. En la temporada de lluvia (junio a octubre), el lavado atmosférico y la reducción de emisiones debido a las vacaciones escolares de verano, favorecen la disminución de la concentración (**Figuras 3.6b,3.7b y 3.8b**).

La relación NO_2/NOx, donde NOx es la suma de NO_2 y NO, permite conocer la proporción de NO_2 dentro de los NOx, que es útil para evaluar las políticas de control de emisiones y estrategias de control (Carslaw, 2005; Carslaw y Beevers, 2005). Esta relación NO_2/NOx en la ZMCM durante 2022, tuvo un valor mínimo del 43 % a las 08:00 h y la máxima fue a las 19:00 h con 88%. Este valor ha incrementado con el tiempo, ya que en comparación con 2015, las mismas horas registraron un mínimo de 28% (08:00 h) que representa un aumento del 15% y el máximo fue 84 % (19:00 h), un incremento del 5%. La relación NO_2/NOx varía con las condiciones de combustión, reacciones atmosféricas, factores meteorológicos y control de emisiones, por ejemplo, en la tecnología de convertidores catalíticos (Brimblecombe et al., 2023; Carslaw, 2005; Chong et al., 2010; Richmond-Bryant et al, 2017; Yang et al., 2018;); por lo que es necesario un análisis para determinar el origen de los cambios en la proporción NO_2/NOx.

En el perfil horario de las tres especies (**Figuras 3.6c,3.7c y 3.8c**), los NOx tienen dos picos, uno en la mañana (07:00 - 08:00 h) relacionado con tránsito vehicular y otro en la noche (22:00 - 23:00 h) asociado con el NO_2. El NO presentó un máximo a las 08:00 h, debido al periodo de actividad vehicular y el NO_2 tiene dos picos, el primero (10:00 h) se relaciona con la oxidación fotoquímica y el segundo (21:00 - 24:00 h) debido a la química nocturna, en la cual hay formación de especies reactivas y contaminantes secundarios, que contribuyen a la fotoquímica del día siguiente.

Durante 2022, los máximos mensuales fueron en diciembre y enero, el NOx con 44 ppb (enero) y 49 ppb (diciembre), NO tuvo 19 ppb y 21 ppb; por último, NO_2 con 25 ppb y 27 ppb, para enero y diciembre, respectivamente. El mínimo mensual fue en septiembre con 22 ppb (NOx), 7 ppb (NO) y 15 ppb (NO_2). Este patrón mensual es congruente con los datos históricos (1988 a 2021), pero 2022 con concentración menores, ya que diciembre (1988 a 2021) obtuvo 73.2 ppb en NOx, 33.8 ppb para NO y 36.4 ppb en NO_2; los mínimos históricos fueron en agosto para NOx (40 ppb) y NO_2 (23 ppb); en junio para NO con 14 ppb (**Figuras 3.6d,3.7d y 3.8d**).

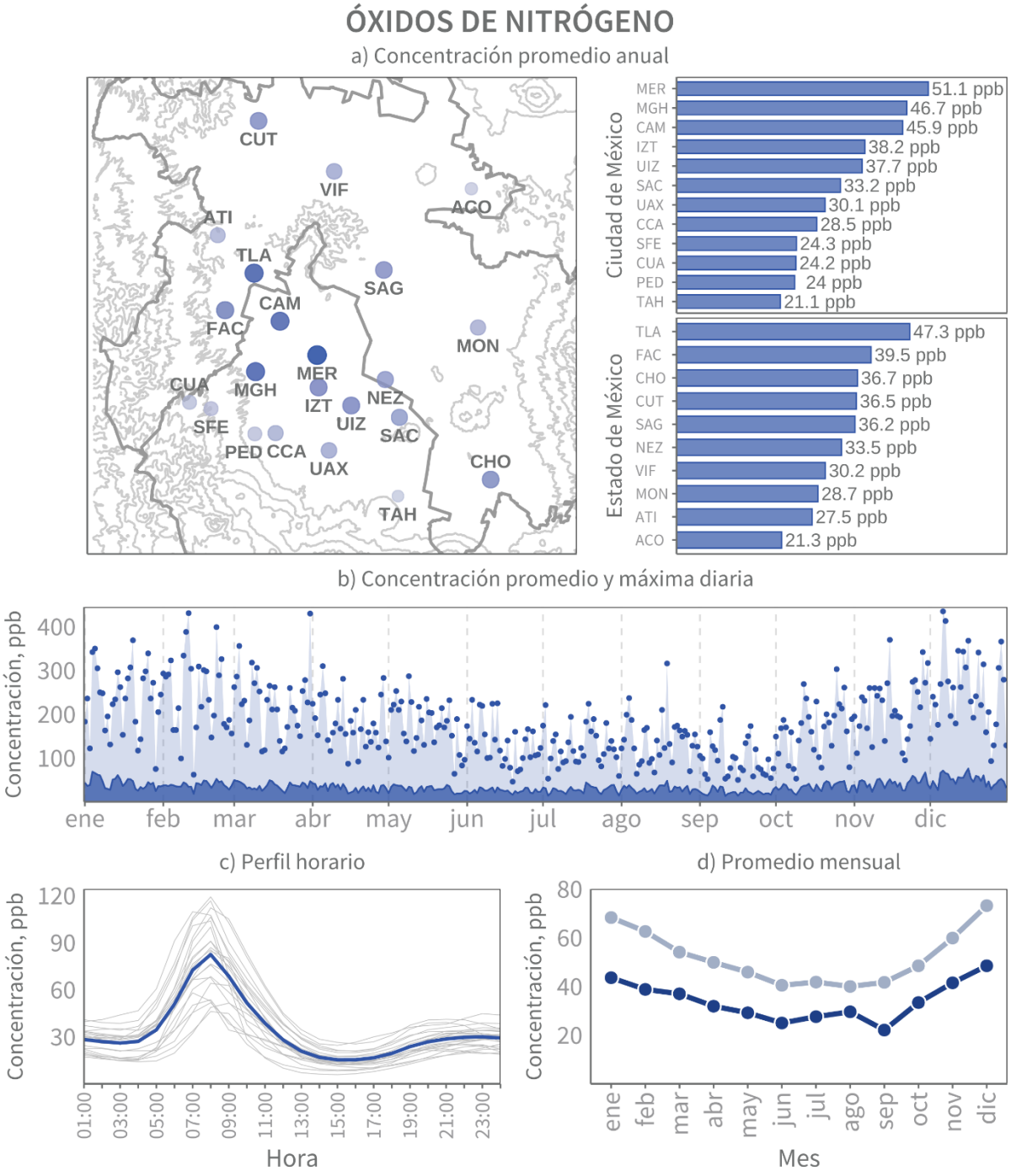


Figura 3.6. a) Promedio anual de NOx por sitio de monitoreo. En el mapa (izquierda), el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del promedio anual y las gráficas de barras (derecha) corresponden al promedio anual dividido por entidad. **b)** Serie de tiempo del promedio diario (área en azul oscuro) y el máximo horario por día (puntos y área sombreada clara)**. c)** Perfil horario del promedio de todas las estaciones (línea azul) y por sitio (líneas grises). **d)** Promedio mensual del 2022 (línea oscura) y datos históricos de 1988 a 2021 (línea clara).

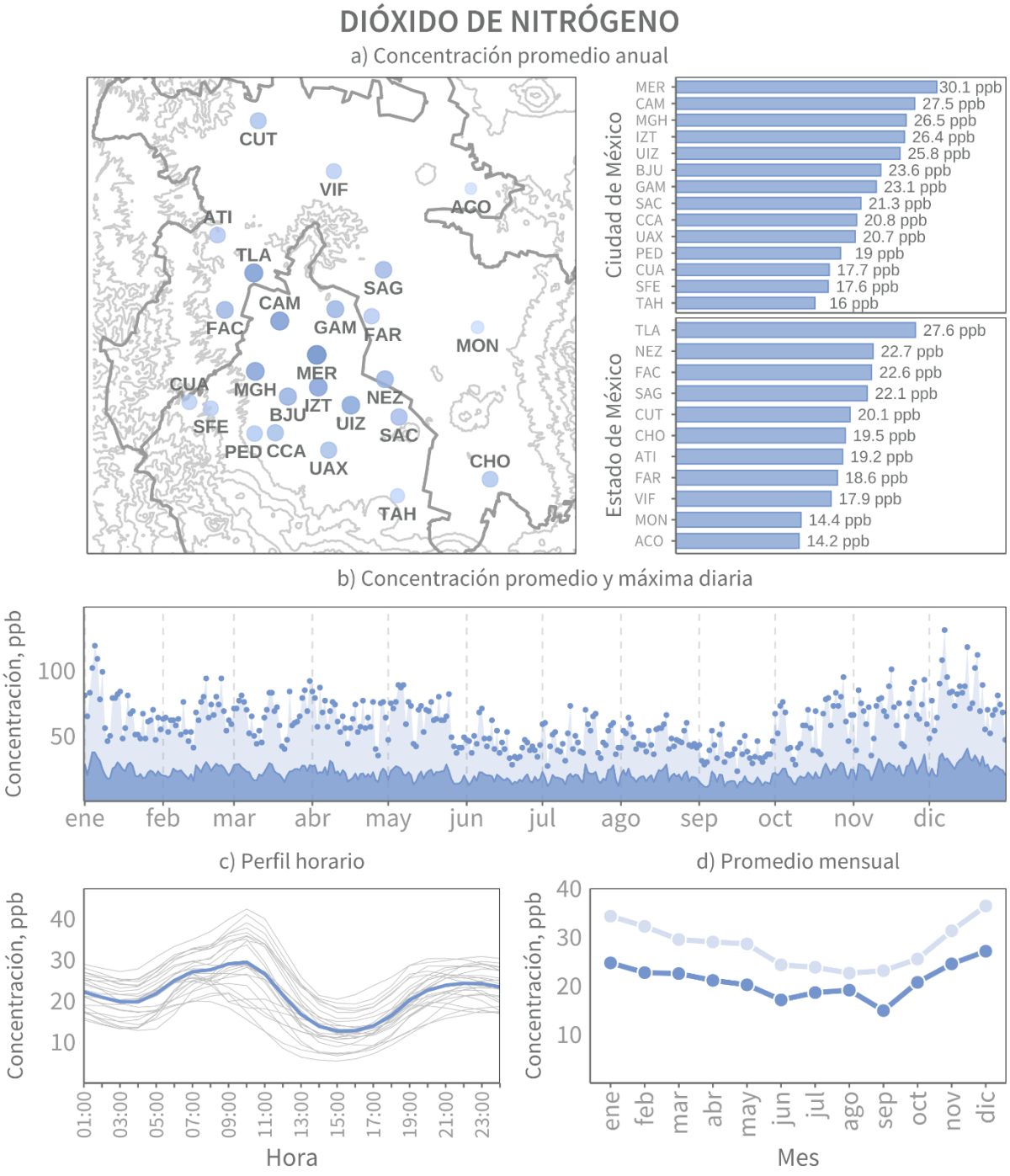


Figura 3.7. a) Promedio anual de NO_2 por sitio de monitoreo. En el mapa (izquierda), el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del promedio anual y las gráficas de barras (derecha) corresponden al promedio anual dividido por entidad. **b)** Serie de tiempo del promedio diario (área en azul oscuro) y el máximo horario por día (puntos y área sombreada clara)**. c)** Perfil horario del promedio de todas las estaciones (línea azul) y por sitio (líneas grises). **d)** Promedio mensual del 2022 (línea oscura) y datos históricos de 1988 a 2021 (línea clara).

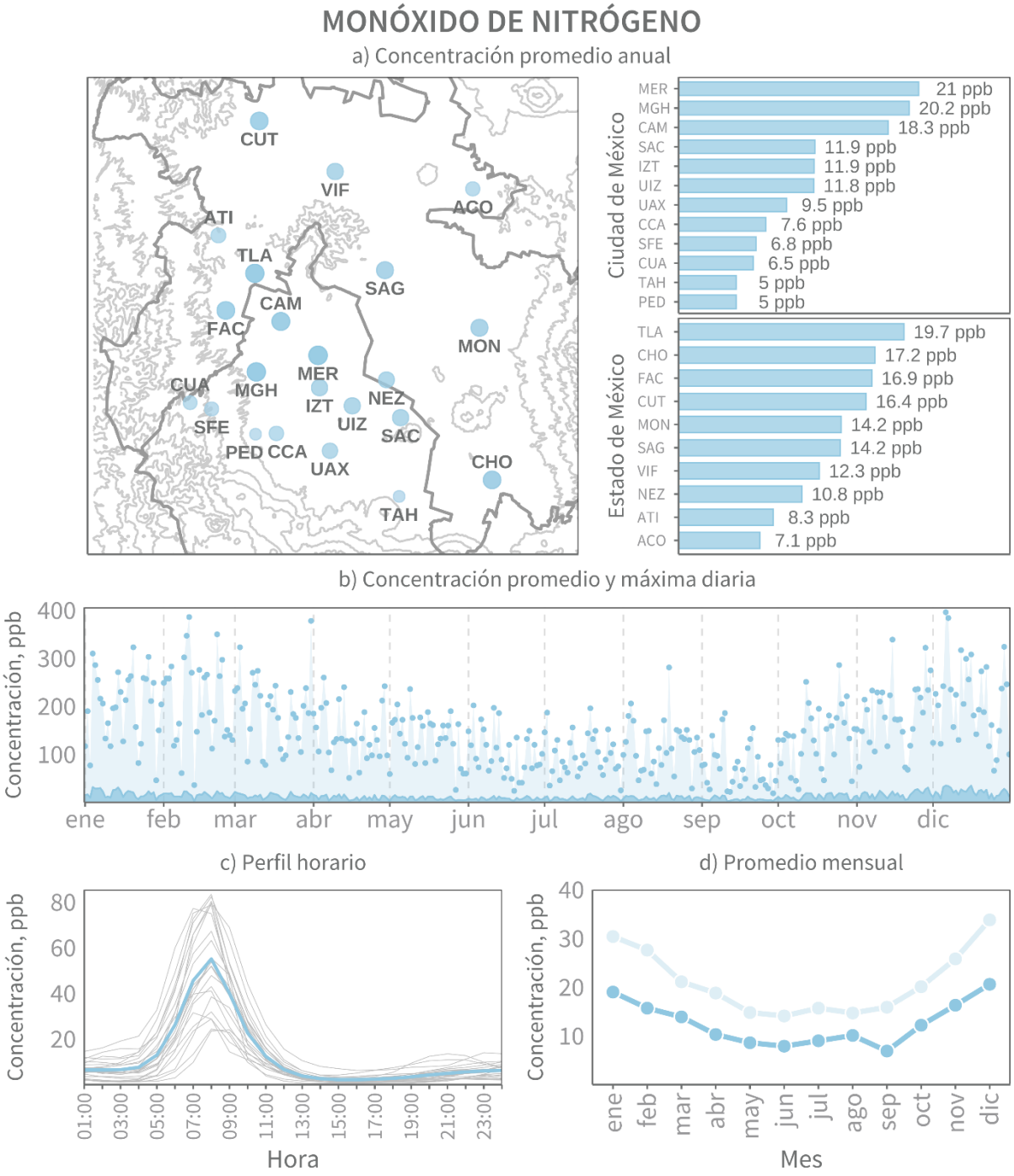


Figura 3.8. a) Promedio anual de NO por sitio de monitoreo. En el mapa (izquierda), el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del promedio anual y las gráficas de barras (derecha) corresponden al promedio anual dividido por entidad. **b)** Serie de tiempo del promedio diario (área en azul oscuro) y el máximo horario por día (puntos y área sombreada clara)**. c)** Perfil horario del promedio de todas las estaciones (línea azul) y por sitio (líneas grises). **d)** Promedio mensual del 2022 (línea oscura) y datos históricos de 1988 a 2021 (línea clara).

MONÓXIDO DE CARBONO

El monóxido de carbono (CO), es uno de los gases traza más reactivos con relevancia en las interacciones del clima y química atmosférica. El CO proviene de la reacción incompleta de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural y madera). Además, se genera en la oxidación de precursores, emisiones oceánicas y de vegetación, así como en incendios forestales, que son más frecuentes e intensos por el cambio climático (Dey et al., 2019; Faïn et al., 2023). El CO influye indirectamente en el cambio climático, ya que afecta a los oxidantes atmosféricos y especies secundarias (**Figura 3.9**). El CO reacciona con los radicales hidroxilos, OH (**Ecuación 1**), los cuales reducen la vida útil de los GEI potentes como el metano (CH_4), por lo tanto, cuando el CO consume OH, aumenta el potencial de calentamiento global de los GEI (Fry et al., 2013; Dey et al., 2019).

$$CO + OH \rightarrow CO_2 + H \qquad \textbf{Ecuación 1}$$

La oxidación fotoquímica del CO (**Ecuación 2**) en presencia de NOx (3-8 ppb a nivel del suelo y 20 ppb en troposfera superior) forman O_3 troposférico, contaminante secundario y de relevancia en la calidad del aire debido su relación con el daño en la salud, en cultivos y en ecosistemas (Graber y Smith, 2007; Sivasakthivel y Reddy, 2011).

$$CO + 2O_2 + hv \rightarrow CO_2 + O_3 \qquad \textbf{Ecuación 2}$$

Las concentraciones de CO entre 15 a 30 ppm, reducen la oxidación del SO_2 para formar sulfatos, los cuales actúan como núcleos de condensación de nubes (**Figura 3.9**) que reflejan la luz solar de vuelta al espacio y neutralizan el efecto de calentamiento de los GEI (Sivasakthivel y Reddy, 2011).

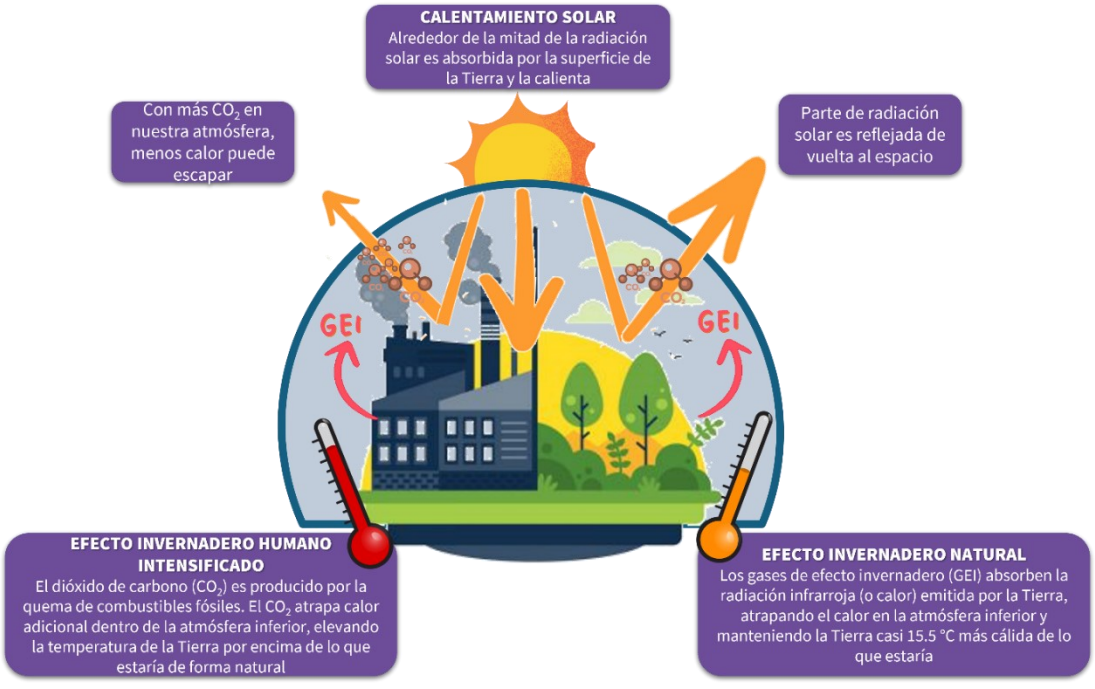


Figura 3.9. Efectos adversos de las emisiones de CO sobre el efecto invernadero. Adaptado de Dey S., 2019

En la ZMVM, la fuente más importante de CO es la quema de combustibles fósiles en los automóviles (SEDEMA; 2023b), por lo que las estaciones cercanas a vialidades con alto tránsito vehicular reportan mayores concentraciones. En 2022, el promedio anual fue de 0.40 pm, ligeramente superior al año anterior (0.39 ppm); este pequeño incremento, puede relacionarse con la recuperación de actividades que estaban suspendidas debido a la pandemia COVID-19. Los sitios ubicados en la CDMX, así como los de EDOMEX, registraron un promedio anual de 0.40 ppm. A nivel estación, el promedio anual máximo fue 0.60 ppm en La Presa (LPR), al noreste de la ZMCM; el segundo máximo fue 0.50 ppm en Merced (MER), Iztacalco (IZT) y Chalco (CHO), esta última localizada al sureste, en los límites de la ciudad y presentó valores similares a los sitios con alto flujo vehicular, porque está influenciada por emisiones de la autopista México-Puebla que son arrastradas por el viento. El mínimo fue en Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (INN) con 0.17 ppm, seguida de Acolman (ACO) con 0.24 ppm, ambas ubicadas en zonas boscosas o semirrurales y tienen baja influencia vehicular (**Figura 3.10a**).

En la serie de tiempo de CO (**Figura 3.10b**), se observa que el comportamiento es similar en la mayor parte del año, excepto en los periodos vacacionales y su variabilidad estacional de CO depende de la meteorología. Los máximos se registran en el invierno, cuando las condiciones meteorológicas son adversas para la dispersión de contaminantes (estabilidad atmosférica, temperaturas bajas, mayor frecuencia de inversiones térmicas, menor altura de la capa límite), particularmente en diciembre, que aumenta el tránsito vehicular por las festividades de fin de año. Los mínimos de CO ocurren en la temporada de lluvia, cuando hay condiciones favorables para la dispersión y remoción de la contaminación.

El perfil horario tiene un pico de concentración a las 08:00 h que está relacionado con el intenso tránsito vehicular y la capa límite baja; también se registra un segundo pico de menor magnitud, entre las 19:00 y 24:00 h, asociado con un ligero incremento en el tránsito vehicular, de la capa límite y una mayor velocidad del viento. El perfil horario del sitio LPR es diferente a las demás estaciones, ya que no decae a las 09:00 h y tiene una reducción de CO más lenta, por lo que a 15:00 h, sus niveles superan al resto de los sitios, este patrón ha sido característico desde el 2018. La estación INN, alejada de vialidades, también tiene un perfil diferente, sin picos matutinos o nocturnos y presenta un incremento gradual desde las 09:00 h, alcanza su máximo a las 15:00 h, que se mantiene hasta las 21:00 h, cuando comienza a reducir (**Figura 3.10c**).

En 2022, el promedio mensual máximo fue 0.58 ppm en diciembre, seguido de enero y noviembre, ambos con 0.50 ppm; los mínimos fueron en septiembre con 0.28 ppm, junio con 0.30 ppm, mayo y julio con 0.33 ppm. Este patrón coincide con los datos históricos, al inicio del año se tienen valores altos que decrecen gradualmente, los mínimos son dentro del periodo de lluvias, e históricamente diciembre ha registrado los máximos (**Figura 3.10d**).

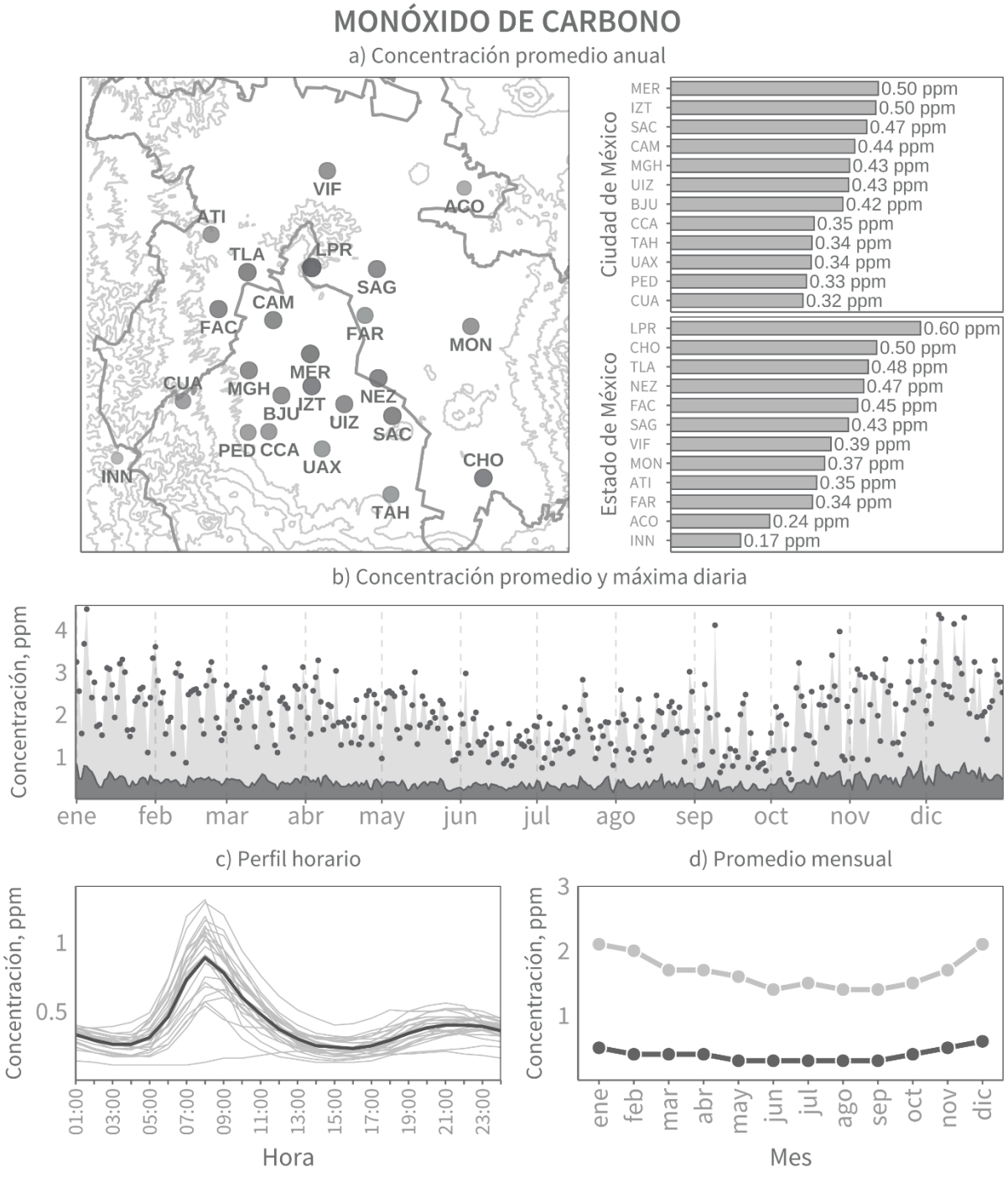


Figura 3.10. a) Promedio anual de CO por sitio de monitoreo. En el mapa (izquierda), el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del promedio anual y las gráficas de barras (derecha) corresponden al promedio anual dividido por entidad. **b)** Serie de tiempo del promedio diario (área en gris oscuro) y el máximo horario por día (puntos y área sombreada clara)**. c)** Perfil horario del promedio de todas las estaciones (línea oscura) y por sitio (líneas claras). **d)** Promedio mensual del 2022 (línea oscura) y datos históricos de 1988 a 2021 (línea clara).

OZONO

El ozono (O_3) troposférico es un compuesto muy reactivo y de gran capacidad oxidante en la atmósfera (Lelieveld et al., 2016); también es un forzador climático de vida corta, por lo que es un GEI con un forzamiento radiativo menor al CO_2 y CH_4, pero es el tercero más importante (IPCC-AR5, 2013). Adicionalmente, el O_3 es perjudicial para la salud humana, los cultivos y los ecosistemas (Monks et al., 2015). El O_3 filtra la radiación ultravioleta (UV) en capas altas de la atmósfera (estratósfera); sin embargo, en las capas bajas (tropósfera), el O_3 es dañino y se forma por reacciones de precursores (óxidos de nitrógeno – NOx y compuestos orgánicos volátiles - COV), que se emiten por fuentes móviles y las actividades humanas. Los precursores del O_3 también son de origen natural, como las emisiones biogénicas de COV, las emisiones de NOx provenientes del suelo y de relámpagos (Cooper et al., 2014; Monks et al., 2015).

La formación de O_3 es el resultado de la reacción de NOx y COV en presencia de luz solar, pero está influenciada por factores meteorológicos como la temperatura, humedad, los patrones de viento, el déficit de presión de vapor (Wells et al., 2021), altura de la capa de mezcla y la nubosidad. Las temperaturas altas favorecen la formación del O_3 y también provocan que la vegetación libere más COV, como el isopreno (Nolte et al., 2018). En la humedad, los niveles bajos prolongan la vida útil del O_3 y el déficit de presión de vapor regula la absorción de O_3 realizada por los árboles a través de las estomas (Arnold et al., 2018). Además, la formación de O_3 depende de la **relación no lineal** de los COV-NOx, esto implica que la reducción de NOx y/o COV no resulta en una disminución directa de O_3, debido al complejo mecanismo en la química de dichos precursores. Por ejemplo, reducir los niveles de NOx mientras los COV permanecen constantes, incrementa la concentración de O_3, este fenómeno se observa en la ZMCM (SEDEMA, 2023a). Los factores mencionados pueden crear condiciones que incrementan el O_3 por lo que pueden contribuir a los niveles futuros del contaminante (Fann et al. 2015).

Existe un vínculo entre el O_3 y el cambio climático, ya que los precursores de O_3 y los GEI comparten fuentes de emisión. Además, los procesos químicos y físicos, sensibles a los cambios en el clima, favorecen la formación de O_3, como incendios forestales, emisiones biogénicas, sequías, el transporte de nitrato de peroxiacilo (PAN), así como la intrusión de O_3 estratosférico. **En consecuencia, los episodios con altos niveles de O_3 serán más frecuentes debido a los fenómenos extremos en un mundo con efectos del calentamiento global.** Por ejemplo, se ha observado que los niveles de O_3 en la superficie han aumentado con las olas de calor en la Unión Europea y los incendios forestales en el oeste de Estados Unidos. La pandemia de COVID-19 presentó un escenario que demostró las fuertes conexiones entre el O_3 y los factores meteorológicos, ya que no hubo una reducción considerable del contaminante incluso con la disminución de emisiones de sus precursores.

Debido a esto, el conocimiento sobre el cambio climático es fundamental para la mitigación del O_3 y es importante que exista una unión entre la investigación científica y las políticas públicas (Lyu et al., 2023).

En la **Figura 3.11,** se observa que la variación del O_3 en la superficie responde a los cambios en las emisiones antropogénicas (incrementos en letras rojas y las reducciones en azul) en Estados Unidos, China y la Comunidad Europea, así como al cambio climático, el forzamiento radiativo (FR); los gases de efecto invernadero (GEIs); al radical hidroxilo (OH) e hidroperóxido (HO_2); así como el intercambio estratósfera – tropósfera (IET). En las últimas décadas se han realizado esfuerzos para comprender las vías de formación del O_3 y su sensibilidad a las emisiones de precursores, mediante las isopletas de O_3 y la relación COV/NOx (Lyu et al., 2023). La crisis climática actual, es una preocupación mundial por lo que se han hecho diversos estudios sobre su mitigación. El análisis de Lyu X. (2023) propone un control sinérgico para el O_3 relacionado con las fuentes de precursores y GEI (**emisión**), así como la interacción O_3 - clima (**mecanismo**), con lo que se esperan beneficios colaterales con estrategias coordinadas (**políticas**). Este análisis promueve el transporte limpio como los vehículos eléctricos (VE) que reducen emisiones de COV-NOx y de GEI (p. ej. CO_2), por lo tanto, hay menor impacto por el sector transporte; sin embargo, el uso de VE sí tiene a emisiones indirectas en la generación de energía para dichos vehículos. También se sugiere aumentar la energía limpia y su eficiencia, lo que disminuye las emisiones de centrales eléctricas e industrias. Existe una creciente conciencia sobre el uso combustibles fósiles; sin embargo, hay otras fuentes de precursores, como el asfaltado y revestimiento; estas son fuentes de COV y emiten GEI (McDonald et al., 2018; Khare et al., 2020). En Hong Kong, se observó que limitar el contenido de COV en los solventes fue una medida eficaz para reducir O_3 (Lyu et al., 2023).

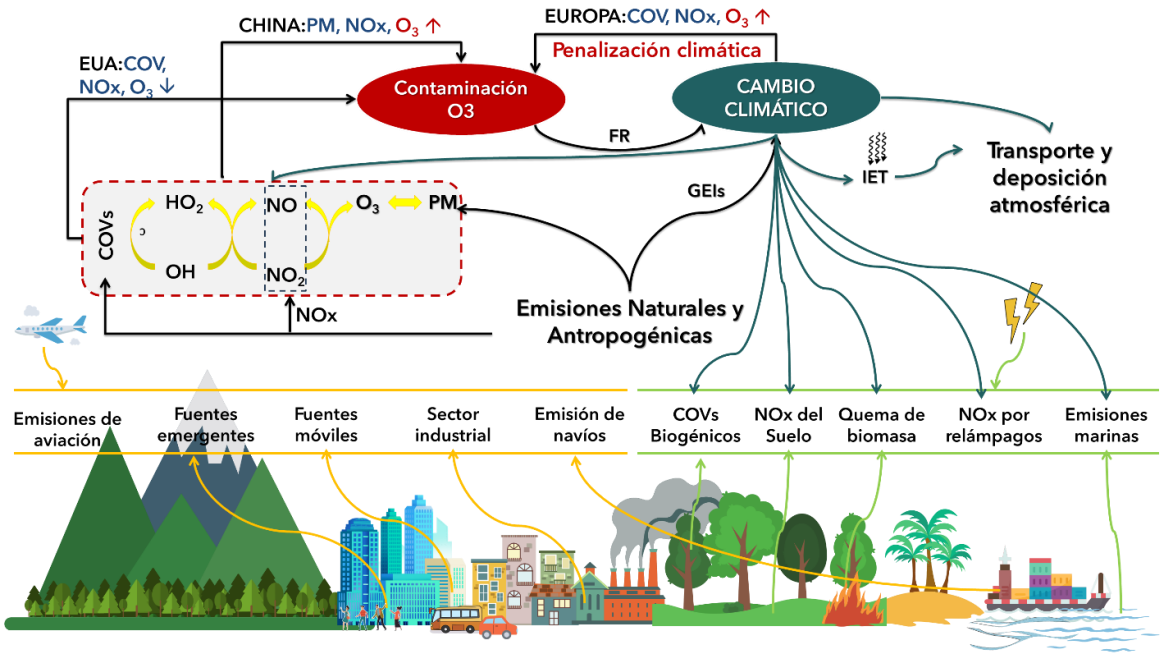


Figura 3.11. Factores y procesos que regulan el ozono troposférico. Adaptado de Lyu et al., 2023.

En la ZMCM, la tendencia de la concentración de O_3 indica un ligero incremento del 8 % para el periodo de 2010 a 2021, por el contrario, su precursor NOx, tiene una reducción del 37 % en el mismo periodo (SEDEMA, 2024). Debido a esto, es necesario realizar más análisis que evalúen el comportamiento del O_3, de sus precursores, su interacción con el cambio climático y la química atmosférica de estos últimos años.

En 2022, el O_3 obtuvo un promedio anual de 30.7 ppb, calculado con las estaciones que registraron 70 % o más de suficiencia de datos, este valor comparado con el 2021 (29.2 ppb) representó un incremento del 5 %. La media de los máximos diarios (1 hora) fue 74.1 ppb, lo que fue un 3 % de aumento comparado con 2021 (71.7 ppb). El límite horario de la NOM (**90 ppb**, NOM-020-SSA1-2021) se superó en 965 horas distribuidas en 229 días del 2022, mientras que el límite para promedio móvil de 8 horas (**65 ppb**) se superó en 245 días. Las estaciones en el centro y sur de la CDMX reportaron las concentraciones máximas debido al transporte de sus precursores (NOx y COV) desde el norte, ocasionado por los patrones de vientos predominantes y posteriormente, se acumulan en la región montañosa del sur. El conteo de horas (O_3 > 90 ppb) por estación (**Figura 3.12a**) tiene su máximo en Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) con 598 horas, seguida de UAM-Xochimilco (UAX) con 450 horas, Benito Juárez (BJU) con 442, Santa Fe (SFE) con 413 y Milpa Alta (MPA) con 370 horas. Los mínimos en el conteo de horas se presentaron en los sitios INN y Acolman (ACO), con 12 y 55 horas respectivamente.

En la serie de tiempo para O_3 (**Figura 3.12b**), los niveles más altos de concentración normalmente ocurren en la temporada de ozono (15 de febrero al 15 de junio) y en este año se presentaron máximos horarios superiores a 155 ppb (valor de activación de Fase I en contingencias de O_3) durante marzo y mayo; sin embargo, en todo el año se registraron promedios horarios que superaron el límite de la NOM (90 ppb). En general, el comportamiento del O_3 es de un incremento gradual desde marzo y hasta mayo, lo que coincide con la temporada seca caliente; mientras que, desde junio los niveles comienzan a disminuir por el inicio de la temporada de lluvia y el mínimo se presentó en septiembre, cuando hubo más precipitación en la ZMCM. A partir de octubre, hay cambios de sistemas de presión relacionados con el cambio estacional (otoño e invierno), en consecuencia, la concentración promedio de O_3 incrementa, pero en diciembre disminuye ligeramente.

En 2022, la concentración máxima horaria fue 172 ppb y ocurrió el 20 de mayo a las 15:00 h en la estación Santa Fe (SFE); ese mismo día, a las 19:00 h, se presentó el máximo del promedio móvil de 8 horas con 145 ppb. Este año, se activaron seis eventos de contingencia, que se describen en el **capítulo 5** de este informe anual, de estos episodios cinco ocurrieron dentro de la temporada de ozono y otro en noviembre. El 23 de octubre también se registró un máximo horario de 157 ppb en el sitio Iztacalco (IZT), pero no se activó la contingencia debido a la corta duración, ya que

después de registrar este valor, se presentaron condiciones favorables que disminuyeron el O_3, así como un pronóstico meteorológico con mejores circunstancias para el día siguiente, esta decisión fue con base al plan vigente en el cual, la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAMe) tiene la autoridad para activar o no una contingencia, con fundamento de un pronóstico meteorológico favorable para la dispersión de los contaminantes (GOCDMX, 2019, Número 100Bis).

Los niveles de O_3 también tienen aporte de la concentración de fondo[3], la cual se define como la fracción de O_3 que no se atribuye directamente a las fuentes antropogénicas locales. De acuerdo con Jacobson (2012), la concentración de fondo para O_3 en regiones con grandes altitudes está entre 30 y 70 ppb. En ambientes urbanos, existe una mayor disponibilidad y variedad de precursores, por lo que hay más generación de O_3 durante el día, pero en las noches, no hay producción fotoquímica de O_3, por lo que el remanente del día se elimina por la dispersión o reacción con otras especies.

En la ZMCM se ha observado que la concentración de O_3 por la noche (fondo) puede alcanzar valores superiores a 20 ppb, especialmente en los sitios con mayor altitud, por ejemplo, la estación Milpa Alta (MPA) registró un valor 34 ppb (promedio de 00:00 a 04:00 h) y Ajusco Medio (AJM) obtuvo 27 ppb. El máximo dentro del periodo nocturno fue cercano al límite normado (90 ppb) y se presentó en AJM con 81 ppb durante el 20 de mayo a las 00:00 h. Debido a esto, es importante analizar las concentraciones de fondo en los sitios de monitoreo para determinar la exposición e impacto en la salud de la población. El perfil diurno de O_3 se caracteriza por alcanzar un valor máximo de las 13:00 a 17:00 h, relacionado con las reacciones fotoquímicas que producen O_3 en presencia de luz solar; mientras que el mínimo fue a las 07:00 h. En la noche, la estación MPA presentó los valores máximos, esto debido a su altura y ubicación, al sur de la ZMCM donde la trayectoria del viento transporta los contaminantes desde la región urbana. El perfil del sitio INN, ubicada en zona boscosa, registró los valores mínimos de O_3 durante el día. Por el contrario, las estaciones con los niveles más altos de O_3 fueron CCA y SFE, las cuales presentaron los máximos del año, así como un mayor número de horas que superan el límite de 90 ppb (1 h) establecido en la NOM (**Figura 3.12c**).

En el comportamiento mensual del O_3 en 2022, septiembre registró el promedio mensual mínimo y mayo registró el máximo, esto es congruente con los datos mensuales históricos (1988-2021); sin embargo, junio del 2022 presentó una ligera reducción comparado con el histórico y se relaciona a las lluvias intensas en dicho mes (**Figura 3.12d**).

[3]La concentración de fondo del O_3 tiene fuentes naturales y antropogénicas. Incluidas: intrusión de ozono estratosférico; producción de O_3 con el metano de pantanos que reacciona con NOx natural (procedente de suelos, rayos e intrusión de la estratosfera; formación de O_3 con COV biogénicos y NOx natural; así como transporte a larga distancia procedente de fuentes alejadas (U. S. EPA, 1993; Vingarzan, 2004).

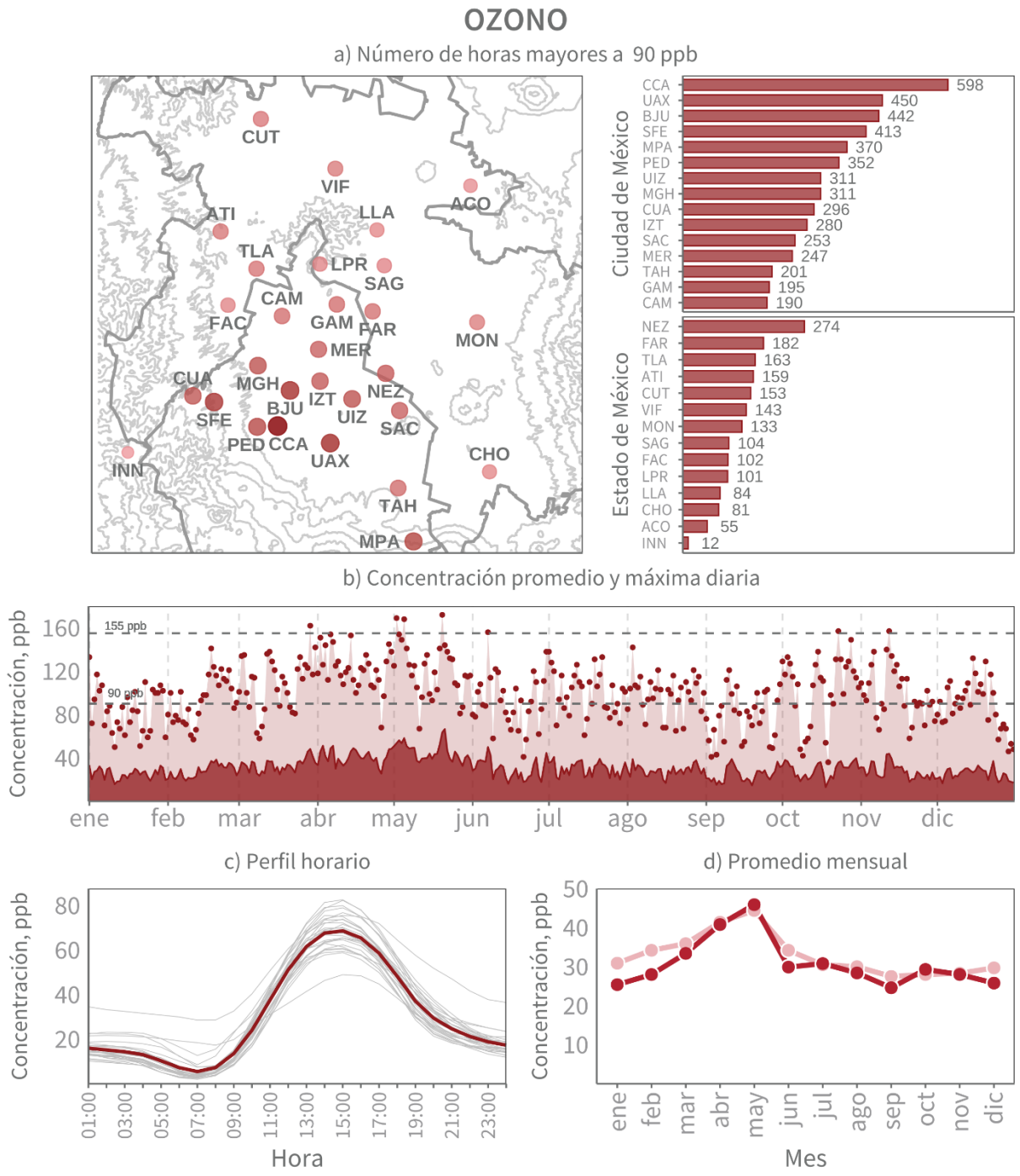


Figura 3.12. a) Promedio anual de O_3 por sitio de monitoreo. En el mapa (izquierda), el color y tamaño del círculo son proporcionales al número de horas > 90 ppb y las gráficas de barras (derecha) corresponden al conteo de horas dividido por entidad. **b)** Serie de tiempo del promedio diario (área en rojo oscuro) y el máximo horario por día (puntos y área sombreada clara). **c)** Perfil horario del promedio de todas las estaciones (línea roja) y por sitio (líneas grises). **d)** Promedio mensual del 2022 (línea oscura) y datos históricos de 1988 a 2021 (línea clara).

PARTICULAS SUSPENDIDAS

Las partículas emitidas por las actividades humanas pueden modular la temperatura de la atmósfera terrestre ya que interactúan con la radiación solar. En general, se ha documentado que las partículas de polvo más gruesas y oscuras pueden absorber la luz, en consecuencia, provocan un calentamiento de la atmósfera; mientras que las partículas finas y de color claro reflejan la luz solar y provocan enfriamiento atmosférico (Chen S., et al., 2021). Los aerosoles, que son partículas líquidas o sólidas suspendidas, se emiten directamente (polvo, sal marina, carbono negro y aerosoles volcánicos) o se pueden formar por reacciones químicas (aerosoles de sulfato, nitrato, amonio y orgánicos secundarios). El tiempo de vida de los aerosoles es corto, por lo que sus máximos se presentan cerca de sus fuentes; además tienen composición química compleja y variaciones en su forma y tamaño (0,01 a 10 micrómetros - µm). Estas características hacen que los aerosoles pueden dispersar y/o absorber radiación de onda corta, por ejemplo, los aerosoles dispersores incluyen a los sulfatos, nitratos, amonio y partículas de sal marina; mientras que los absorbentes son principalmente carbono negro (BC, por sus siglas en inglés), con polvo y carbono orgánico (Li et al., 2022).

Los aerosoles influyen directamente en el balance energético de la Tierra y, por lo tanto, en el clima. Por ejemplo, los aerosoles alteran el balance de radiación y de estabilidad atmosférica con perturbaciones en el perfil vertical de temperatura; también actúan como núcleos de condensación de nubes (NCN) o partículas de nucleación del hielo (PNH), que modifican la microfísica, duración y reflectividad de las nubes. En conjunto, estas alteraciones se cuantifican como forzamiento de aerosoles (cambio del flujo radiativo neto evaluado en relación con las condiciones preindustriales estimadas). A nivel mundial, se estima que los aerosoles antropogénicos producen un enfriamiento de aproximadamente -1.3 ± 0.7 W/m^2 en la parte superior de la atmósfera; −0.3 ± 0.3 W/m^2 debido a la interacción aerosol-radiación (IAR), −1.0 ± 0.7 W/m^2 a las interacciones aerosol-nube, −1.15 W/m^2 al forzamiento total de los aerosoles dispersos y +0.12 W/m^2 al carbono negro (CN). El forzamiento combinado de los aerosoles compensa un tercio del calentamiento causado por los GEI antropogénicos (IPCC, 2021).

La determinación del efecto final del forzamiento de los aerosoles es complicada, ya que afectan el balance energético y clima en diferentes vías (**Figura 3.13**), las cuales incluyen la dispersión/absorción directa de radiación (**efectos directos**) así como la interacción entre estos dos efectos y con las nubes (Chen et al., 2021). De acuerdo con el informe de 2021, realizado por el grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), la contaminación por aerosoles ha causado un enfriamiento de 0.4 °C en el planeta (IPCC, 2021).

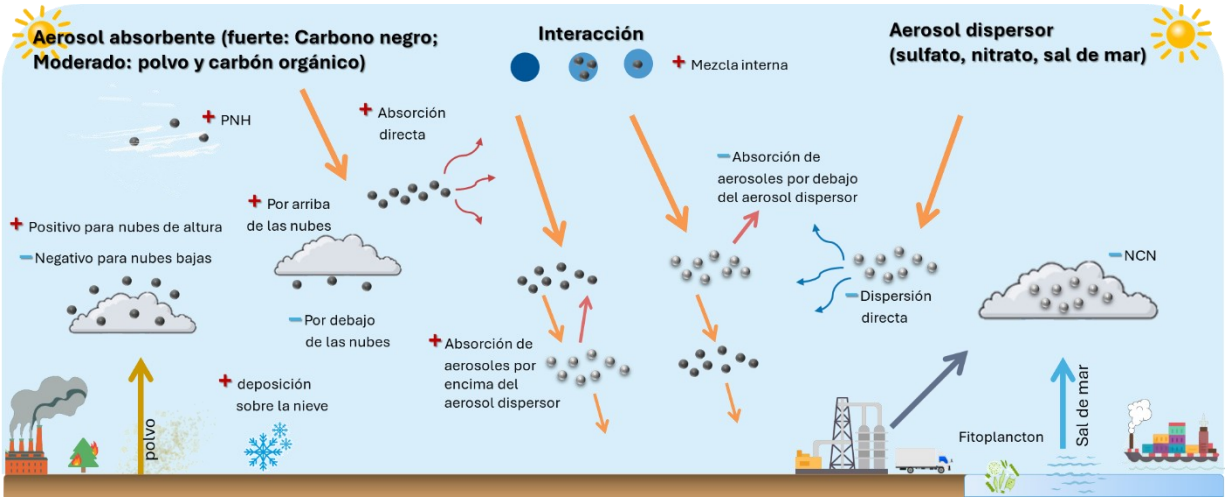


Figura 3.13. Efectos de los aerosoles absorbentes (puntos grises oscuro) y dispersores (gris claro). Los aerosoles dispersores inducen un forzamiento negativo (–) ya que reflejan la luz e interactúan con nubes; los absorbentes, tienen un efeto de calentamiento (+), su relación con las nubes provoca un ligero enfriamiento. La interacción aerosoles dispersores-absorbentes induce el calentamiento. El diagrama presenta la luz solar incidente (flechas naranjas claro), radiación solar dispersada por aerosoles (flechas naranjas oscuro), la radiación reemitida por los aerosoles (flechas rojas); luz dispersada (flechas azules). Las siglas NCN son núcleo de condensación de nubes y PNH, partícula nucleadoras de hielo. Adaptado de Li et al., 2022.

El efecto del cambio climático sobre la concentración de partículas es, principalmente, el incremento exponencial de incendios forestales ocasionados por sequías y temperaturas altas. La contaminación por partículas es un tema complejo por la diversidad de sus fuentes (antropogénicas y naturales), compuestos, características físicas y químicas, por lo que es necesario analizarlas con detalle.

Las estaciones de RAMA miden las fracciones de partículas: PM_{10} (suma de finas y gruesas), $PM_{10-2.5}$ (gruesas) y $PM_{2.5}$ (finas). El promedio anual 2022 en la ZMCM (sitios con suficiencia ≥70%) para las tres fracciones fue 39 µg/m^3 (PM_{10}), 17 µg/m^3 ($PM_{10-2.5}$) y 19 µg/m^3 ($PM_{2.5}$), estos valores no tuvieron diferencias significativas con el 2021. En la CDMX, los promedios anuales fueron 35, 15 y19 µg/m^3, en PM_{10}, $PM_{10-2.5}$ y $PM_{2.5}$, respectivamente. En el indicador del promedio diario (24 h), PM_{10} registró su máximo de 207 µg/m^3 (1 de enero, sitio VIF); en $PM_{2.5}$ fue 85 µg/m^3 (1 de enero, estación San Agustín-SAG) y $PM_{10-2.5}$, tuvo un máximo de 67 µg/m^3 (7 de abril, en SAG y Tlalnepantla-TLA). En 2022 no se registraron valores suficientemente altos de partículas que activaran una contingencia.

La distribución espacial de las PM_{10} (**Figura 3.14a**) está relacionada con el tránsito vehicular, actividades agrícolas, erosión del suelo y actividad industrial en el norte, por lo tanto, los valores más altos de PM_{10} se reportan en las estaciones al norte de la ZMCM, específicamente las que están ubicadas en EDOMEX, como VIF que tuvo el máximo del promedio anual con 56 µg/m^3; sin embargo, el sitio Chalco (CHO), al sureste, también obtuvo concentración alta debido a que está cerca de vialidades. Por el contrario, el mínimo anual se presentó en la estación INN.

Las $PM_{2.5}$ tienen una mayor homogeneidad en su distribución espacial, debido a su porción de origen secundario (del 60 al 80%), excepto en las estaciones Santa Fe (SFE), al poniente de la CDMX, e INN localizada en la zona boscosa (**Figura 3.15a**). La fracción gruesa $PM_{10\text{-}2.5}$, tuvo un patrón similar a PM_{10}, ya que tienen composición mayormente primaria, los máximos fueron en los sitios TLA y SAG, que cumplieron con suficiencia de datos, mientras que los mínimos se registraron en SFE, Pedregal (PED) e INN, ubicadas en el sur de la ZMCM (**Figura 3.16a**).

Las series de tiempo para los tres tamaños de partículas (**Figura 3.14b, 3.15b y 3.16b**), presentaron mayores concentraciones durante la temporada seca, en PM_{10} los máximos fueron en marzo (51.1 $\mu g/m^3$), relacionado con el evento de viento intenso, y en diciembre (50.0 $\mu g/m^3$), asociado a condiciones de estabilidad atmosférica e inversiones térmicas. La fracción $PM_{10\text{-}2.5}$ tuvo un promedio mensual máximo en marzo (25.3 $\mu g/m^3$), seguido de abril y diciembre. En las $PM_{2.5}$, que tienen origen secundario, sus máximos fueron en abril y mayo con 23.7 y 23.6 $\mu g/m^3$, respectivamente, ocasionado por condiciones meteorológicas que favorecen la formación de contaminantes secundarios y los incendios. Los niveles de partículas disminuyeron considerablemente durante la temporada de lluvia (junio a octubre), debido al efecto de lavado atmosférico y septiembre presentó la media mensual mínima en las tres fracciones.

Las variaciones horarias (**Figuras 3.14c, 3.15c y 3.16c**) de PM_{10} y $PM_{10\text{-}2.5}$ en la mayoría de las estaciones se caracterizó por dos picos de concentración, el primero de las 08:00 a las 10:00 h y el segundo de las 18:00 a 19:00 h. Ambos están influenciados por contribuciones del transporte, como la re suspensión de polvos y emisiones del escape. En la tarde, se observó un aporte del polvo levantado por el viento, principalmente en la fracción gruesa ($PM_{10\text{-}2.5}$), con valores más altos que en la mañana. En las $PM_{2.5}$, el perfil se caracterizó por un pico único de 10:00 a 12:00 h, el cual se asocia con la formación de aerosoles inorgánicos (nitratos, sulfatos) y orgánicos (compuestos con baja presión de vapor con grados de oxidación). En las estaciones PED y SFE predominó la contribución secundaria, con un pico entre las 13:00 y las 14:00 h. En los sitios que están influenciados por el transporte ocasionado por el viento desde las zonas más contaminadas (p. ej., INN), su máximo se presentó durante la tarde.

En el promedio mensual, las tres fracciones presentaron valores altos en las temporadas secas (caliente y fría), con los mínimos en la temporada de lluvias; sin embargo, si se compara con los datos históricos (PM_{10}: 1995-2021, $PM_{2.5}$: 2003-2021 y $PM_{10\text{-}2.5}$: 2012-2021), las tres partículas cambiaron sus patrones durante enero, febrero y diciembre, con ligeros decrementos ocasionados por una mayor humedad en el periodo invernal 2022. En las tres fracciones, septiembre tuvo el mínimo en 2022, lo cual es congruente con el comportamiento histórico, pero el promedio mensual fue de menor magnitud debido a la intensidad de la lluvia durante 2022 (**Figuras 3.14d, 3.15d y 3.16d**).

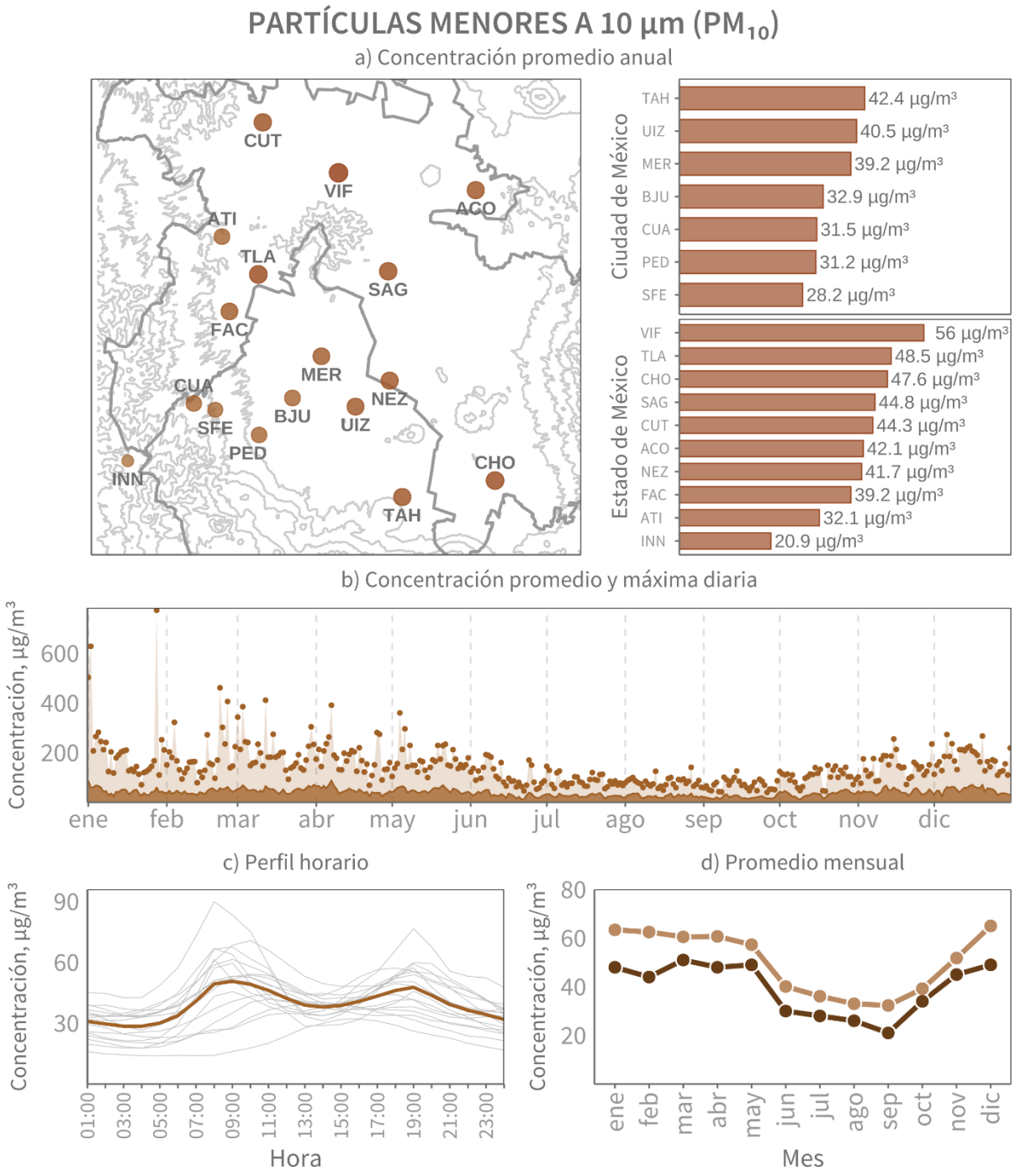


Figura 3.14. a) Promedio anual de PM_{10} por sitio de monitoreo. En el mapa (izquierda), el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del promedio anual y las gráficas de barras (derecha) corresponden al promedio anual dividido por entidad. **b)** Serie de tiempo del promedio diario (área en café oscuro) y el máximo horario por día (puntos y área sombreada clara)**. c)** Perfil horario del promedio de todas las estaciones (línea café) y por sitio (líneas grises). **d)** Promedio mensual del 2022 (línea oscura) y datos históricos de 1995 a 2021 (línea clara).

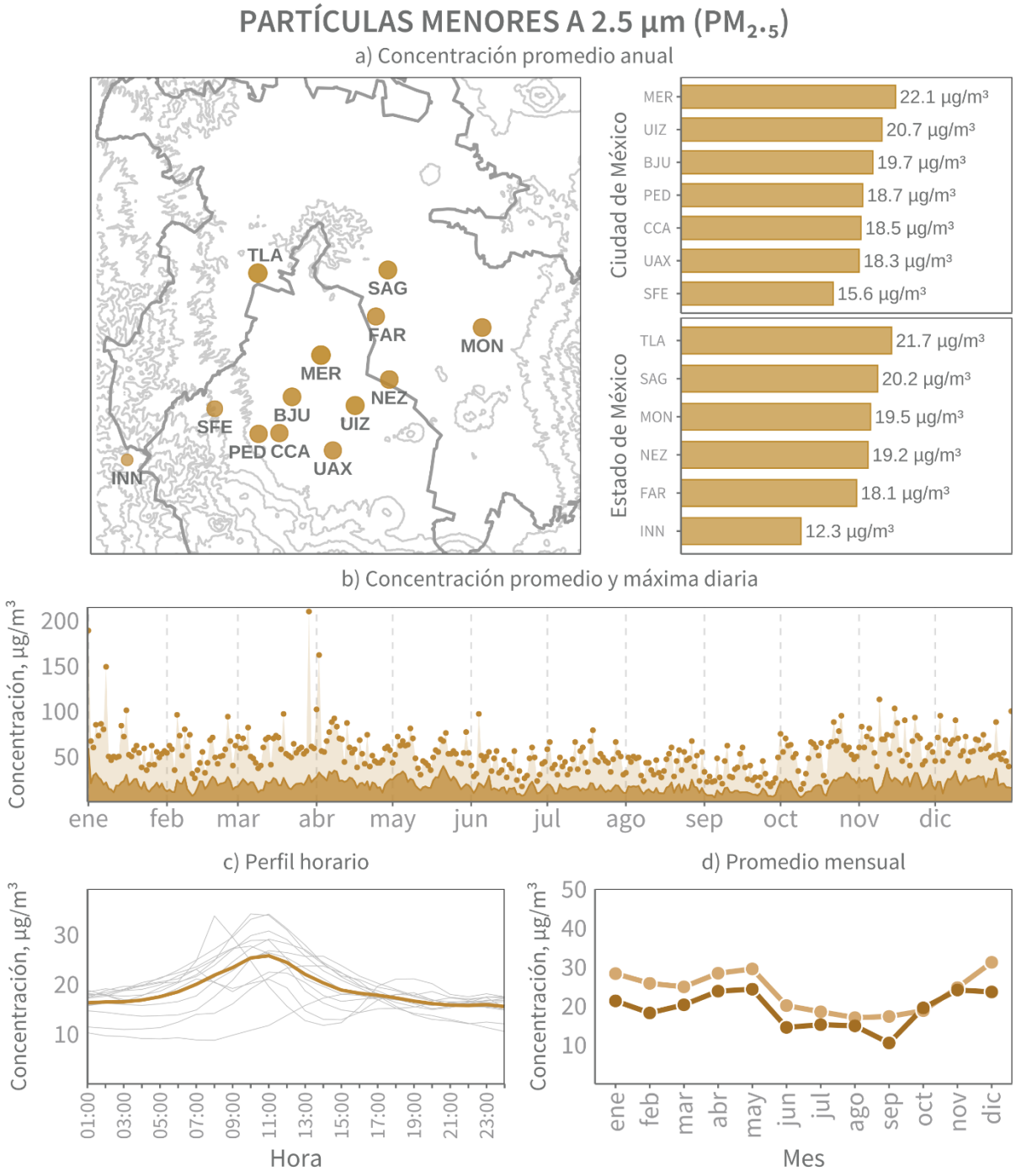


Figura 3.15. a) Promedio anual de $PM_{2.5}$ por sitio de monitoreo. En el mapa (izquierda), el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del promedio anual y las gráficas de barras (derecha) corresponden al promedio anual dividido por entidad. **b)** Serie de tiempo del promedio diario (área en café oscuro) y el máximo horario por día (puntos y área sombreada clara)**. c)** Perfil horario del promedio de todas las estaciones (línea café) y por sitio (líneas grises). **d)** Promedio mensual del 2022 (línea oscura) y datos históricos de 2003 a 2021 (línea clara).

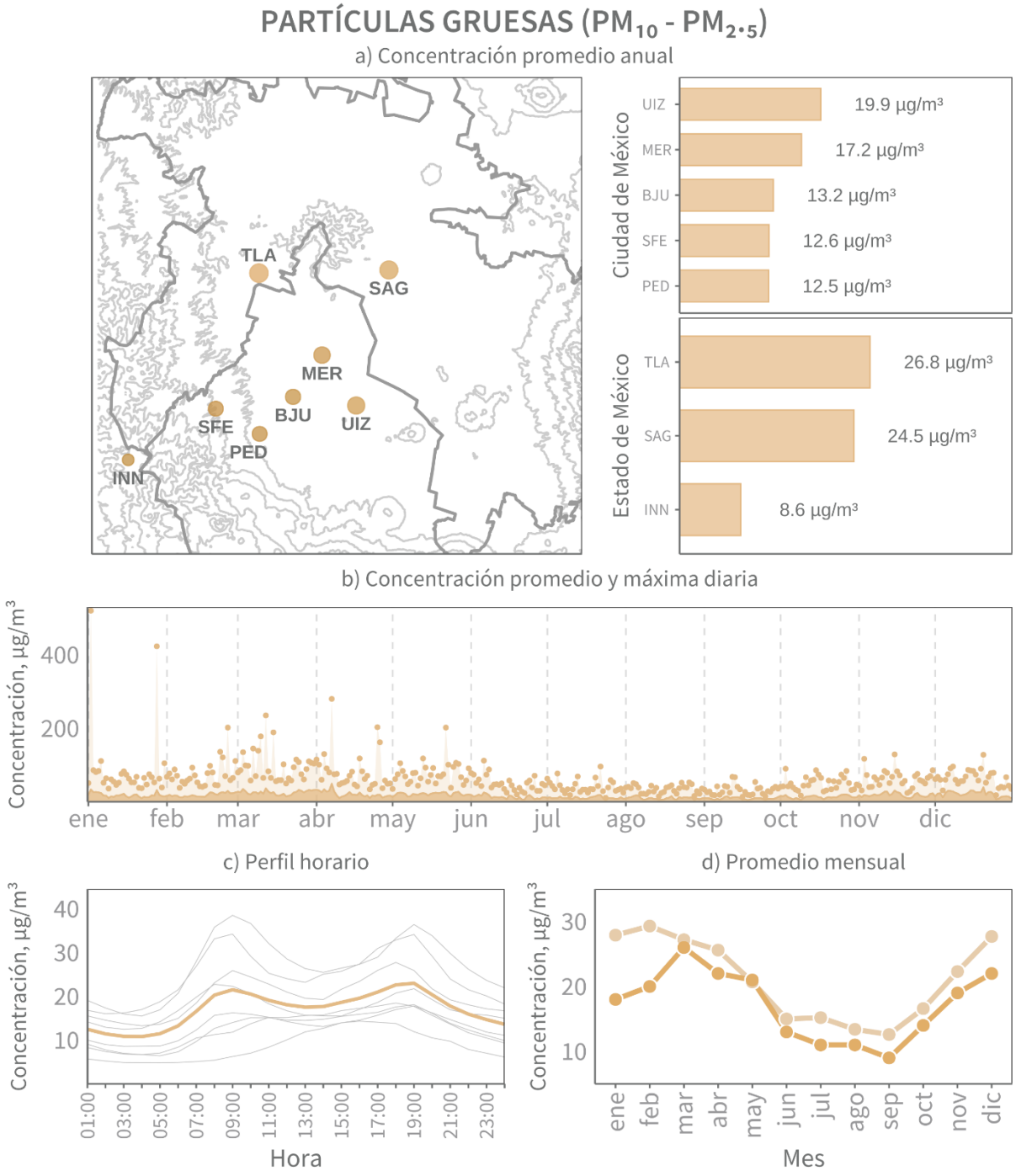


Figura 3.16. a) Promedio anual de $PM_{10-2.5}$ por sitio de monitoreo. En el mapa (izquierda) se presenta la ubicación de la estación, el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del promedio anual y las gráficas de barras (derecha) corresponden al valor del promedio anual dividido por entidad. **b)** La serie de tiempo del promedio diario es el área en oscuro, los puntos y el área sombreada clara son la concentración horaria máxima por día**. c)** Perfil horario, la línea gruesa es el promedio de todas las estaciones y las líneas grises son el perfil horario por sitio. **d)** promedio mensual, la línea clara es el promedio mensual de 2012 a 2021, la línea obscura es el valor del promedio mensual en 2022.

CAMBIO CLIMÁTICO Y CALIDAD DEL AIRE

El impacto **del cambio climático sobre la contaminación del aire** es notable en los procesos físicos y químicos. El cambio climático aumenta la frecuencia e intensidad de eventos extremos, como temperatura, huracanes, sequías, incendios forestales, entre otros. Por su parte, los contaminantes atmosféricos también influyen en el clima, ya que modifican las propiedades de las nubes, de la precipitación y el balance de radiación. Los responsables de la gestión de la calidad del aire tienen como objetivo proteger la salud pública mediante el control de las emisiones; sin embargo, las estrategias de mitigación podrían ser afectadas por los cambios en el clima. En el transcurso de los años se ha observado un rápido cambio del clima global, por lo que es importante conocer las implicaciones en la calidad del aire y en la sociedad (**Figura 3.17**). Los contaminantes del aire con mayor atención en la salud pública son el O_3 troposférico y las partículas en suspensión (Jacob y Winner, 2009).

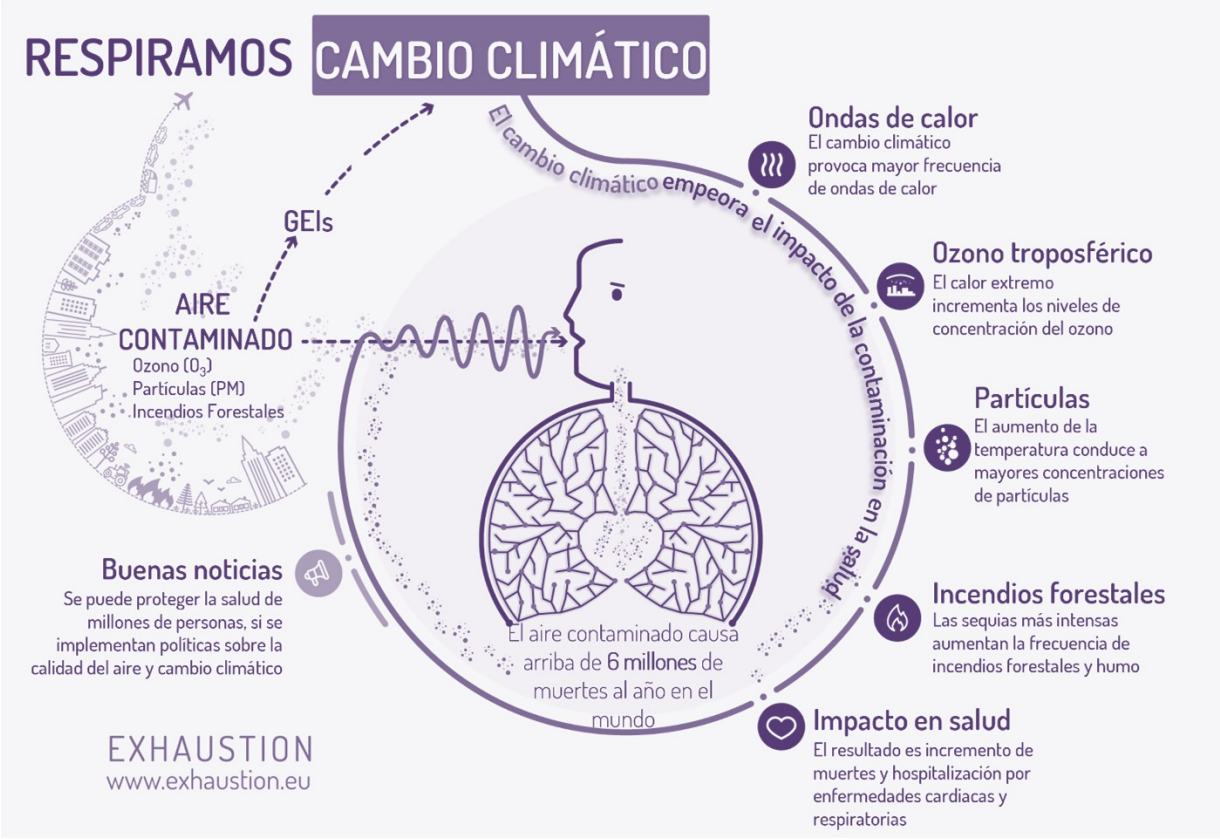


Figura 3.17. Vínculo entre las olas de calor, contaminación del aire, incendios forestales, salud humana y el cambio climático. Adaptado de: Info Design Lab, www.exhaustion.eu

Los valores altos de O_3 a nivel mundial muestran una fuerte correlación con la temperatura, la cual se puede reproducir con modelos donde se considera la estabilidad térmica del PAN, emisiones biogénicas de isopreno y la relación O_3-temperatura con estabilidad atmosférica. El aumento de la temperatura es una consecuencia del cambio climático, por lo que la correlación O_3-temperatura tiene argumentos evidentes sobre el cambio climático y el pronóstico desfavorable con respecto al O_3 (Cheng et al., 2007). Las consecuencias del cambio climático en partículas es un tema más complejo debido a la diversidad de fuentes, componentes, efectos compensatorios (calentamiento-enfriamiento) y la incertidumbre en proyecciones del Modelo General de Circulación (MGC)[4] en el ciclo hidrológico. El pronóstico más relevante es que el aumento de la temperatura tendrá un ligero efecto negativo sobre las partículas ocasionado por la evaporación de componentes semivolátiles (nitratos, orgánicos), lo que estará parcialmente compensado por el aumento de sulfatos (Christensen et al., 2007; Wise y Comrie, 2005; Aw y Kleeman, 2003). Para lograr una reducción de partículas se debe considerar una estrategia para los incendios forestales, los cuales se prevé que sean más frecuentes con el cambio climático.

El conocimiento actual indica que el cambio climático representa una penalización y obstáculo importante en la gestión ambiental con respecto a los objetivos de calidad del aire para O_3. La penalización climática afecta los niveles de O_3, por lo que representa un desafío en las medidas de control de precursores, que deberán ser más estrictas para alcanzar objetivos de calidad del aire y normatividad; se ha documentado que la penalización climática puede aumentar el máximo de ozono de 1 a 3 ppb por cada grado Celsius (Bloomer et al, 2009; Nolte et al., 2018). Las estrategias de control actuales para reducir la contaminación estarán obstaculizadas por el cambio climático; sin embargo, será importante evaluar el efecto local de los posibles cambios sobre las condiciones de la producción de O_3, ya sea limitadas por NOx o por COV (Jacob y Winner, 2009). Es probable que la concentración de fondo del O_3 también se convierta en un problema importante para la gestión ambiental, ya que aumentará con más emisiones de metano y NOx (Fiore, et al. 2002), en consecuencia, será más difícil cumplir con los estándares de calidad del aire para ozono, que son cada vez más estrictos.

Es importante analizar la interrelación cambio climático-contaminación en las estrategias de mitigación y control. Sin embargo, existen incertidumbres sobre estas interacciones que requieren más atención como: **a)** Efectos aislados en la contaminación y emisiones naturales en los periodos 2030, mediados (año 2050) y finales de siglo, (2100); **b)** Impacto de los cambios combinados en la contaminación y emisiones sobre el clima; **c)** Efectos del cambio climático en incendios forestales; **d)** Políticas de control y mitigación del cambio climático.

[4] Modelo que simula el cambio climático del siglo 21, acoplado a modelos de transporte químico.

TENDENCIA

Las redes de monitoreo de la calidad del aire y los inventarios de emisiones son herramientas para la evaluación y la gestión de la contaminación atmosférica que sirven para la formulación de políticas en los gobiernos locales y/o federales. Los inventarios de emisiones proporcionan un seguimiento de los cambios en el número de fuentes, así como la cantidad de compuestos que liberan; sin embargo, la complejidad de los procesos atmosféricos y las condiciones locales ocasionan que los datos de emisiones no sean un indicador preciso de la concentración o la exposición a los contaminantes. Por lo tanto, los datos de las redes de monitoreo pueden demostrar correlaciones y tendencias en los contaminantes. Esta información es relevante para estimar los efectos reales de los cambios sociales, de infraestructura y de normatividad sobre la calidad del aire. El análisis de tendencias es importante para estudiar los cambios en la concentración de contaminantes en el tiempo y puede ser usado como evidencia de la eficacia de las políticas ambientales (Lang et al, 2019).

En la ZMCM, desde 1990 se han aplicado diferentes programas para reducir emisiones de las diversas fuentes, inició con el Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica (PICCA) en 1990, hasta el último Programa para mejorar la calidad del Aire en el Valle de México (PROAIRE 2021-2030). En términos generales, estos programas han logrado reducir los niveles de los principales contaminantes primarios como CO, SO_2, NOx, partículas suspendidas totales (PST).

En el análisis del porcentaje de cambio en la concentración anual de contaminantes (**Figura 3.18**), se observa que 2020 tuvo reducciones notables en la mayoría de los contaminantes debido a las restricciones de actividades en la pandemia COVID-19, con excepción del O_3, el cual depende de sus precursores y de la sensibilidad de la atmósfera (COV o NOx), además de su fuerte correlación con factores meteorológicos, en consecuencia, 2020 registró incremento en dicho contaminante. En el 2022, se observó que la mayoría de los contaminantes mantuvieron un comportamiento similar al año 2021, con excepción del O_3, que registró concentraciones más altas y esto representó un menor porcentaje de reducción. El promedio anual de PM_{10} también tuvo cambios ya que fue menor que en 2021, por lo tanto, presentó un mayor porcentaje de reducción. Es importante mencionar que no se observan cambios significativos en los niveles de contaminación en los últimos años, lo que podría indicar una condición de equilibrio entre las estrategias de control y el volumen de emisiones, así como un cambio en la química atmosférica causada por factores meteorológicos.

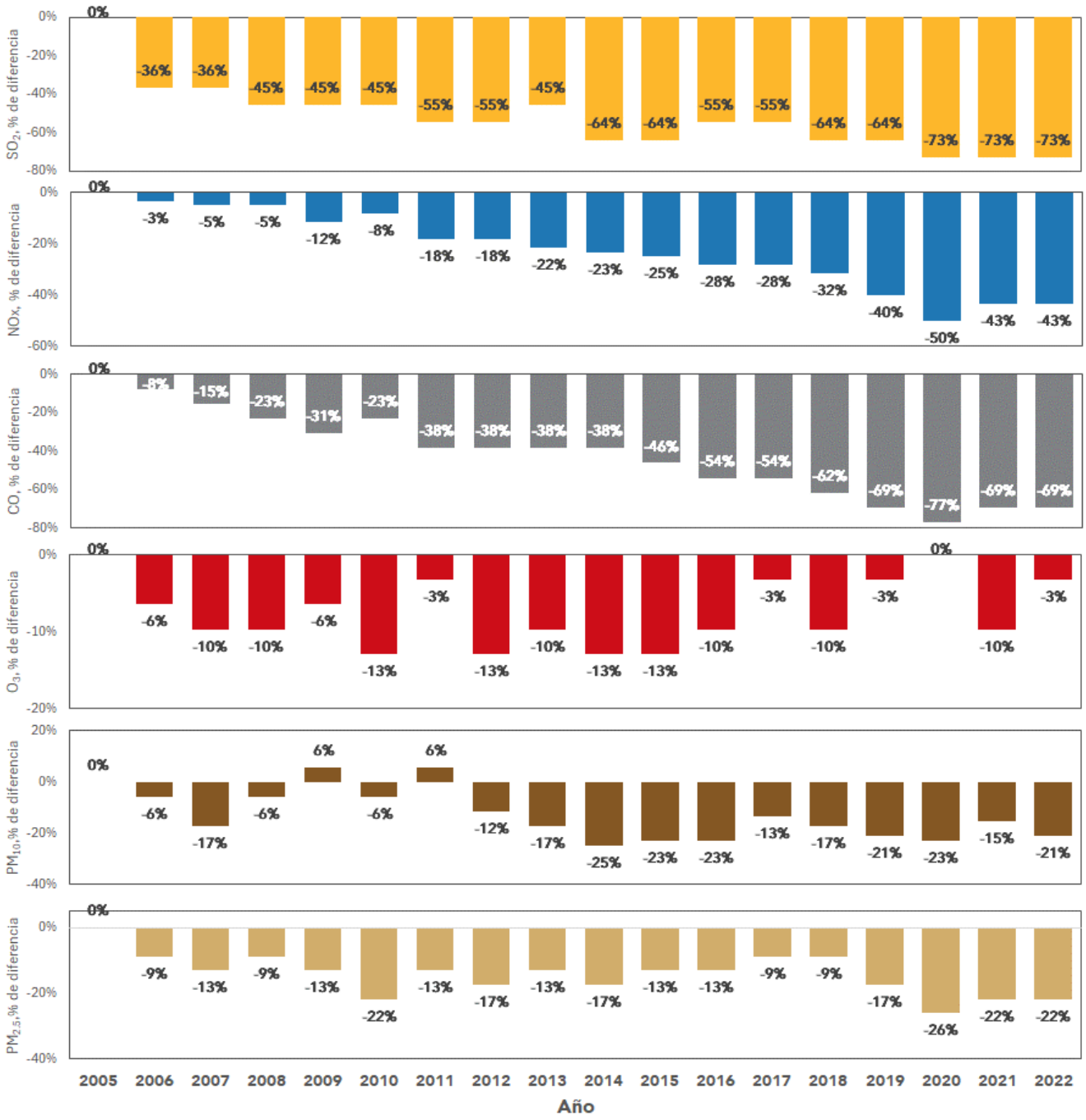


Figura 3.18. Porcentaje de cambio en los promedios anuales (desde 2006 al 2022) con respecto al promedio del 2005 para los principales contaminantes.

En las series de tiempo históricas (**Figuras 3.19 a 3.26**) se presentan los promedios mensuales de cada contaminante desde 1995 al 2022, la desviación estándar y la línea de tendencia que utiliza el método **LOESS**, que es una técnica no paramétrica de regresión ponderada para ajustar una curva suave a través de puntos en un diagrama de dispersión.

En los promedios mensuales se puede observar el comportamiento atípico del 2020 que estuvo influenciado por la pandemia COVID-19 y sus restricciones. En el 2022, los contaminantes NOx, NO_2, CO y O_3 presentaron ligeros incrementos en sus promedios mensuales con respecto al año anterior, por el contrario, SO_2, tuvo reducciones. Las partículas mantuvieron su tendencia similar al año anterior. La línea de ajuste LOESS muestra una tendencia decreciente en la mayoría de los contaminantes, la cual es consistente con la aplicación de medidas para el control de emisiones y los programas de calidad del aire, ya que, desde finales de los noventa, se observan reducciones en la mayoría de los contaminantes.

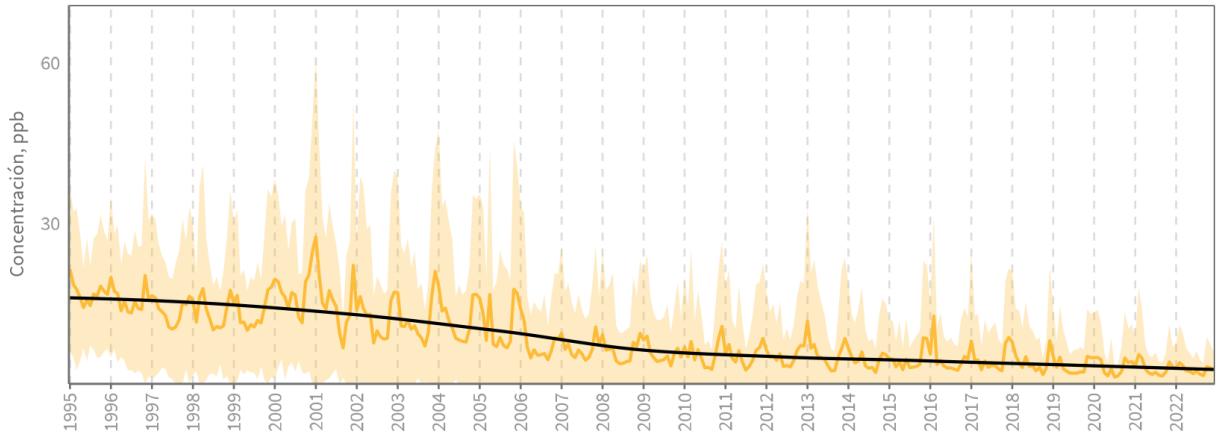


Figura 3.19. Serie de tiempo con promedios mensuales de SO_2 (1995-2022). La línea amarilla es el promedio de todas las estaciones, la región sombreada amarilla es la desviación estándar alrededor del promedio y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

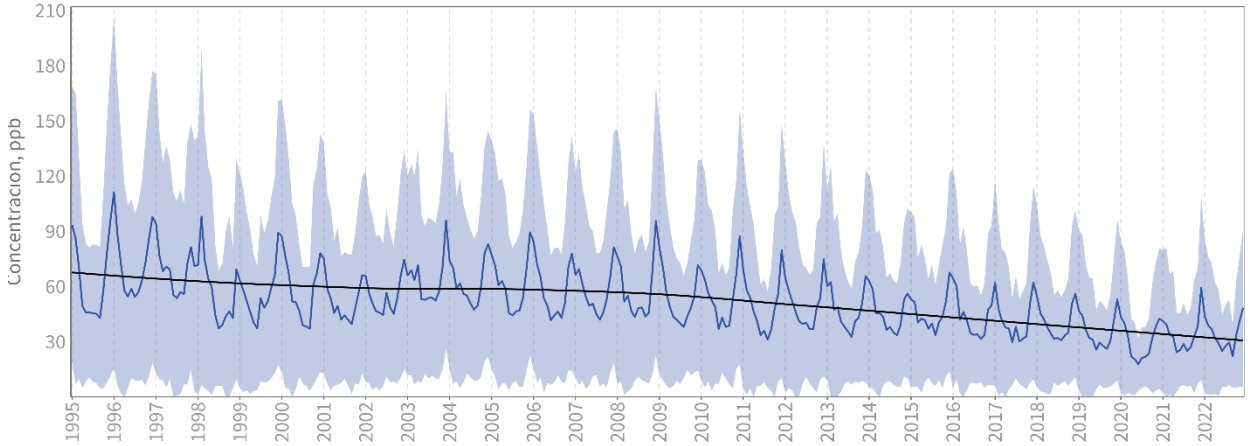


Figura 3.20. Serie de tiempo con promedios mensuales de NOx (1995-2022). La línea azul es el promedio de todas las estaciones, la región sombreada azul es la desviación estándar alrededor del promedio y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

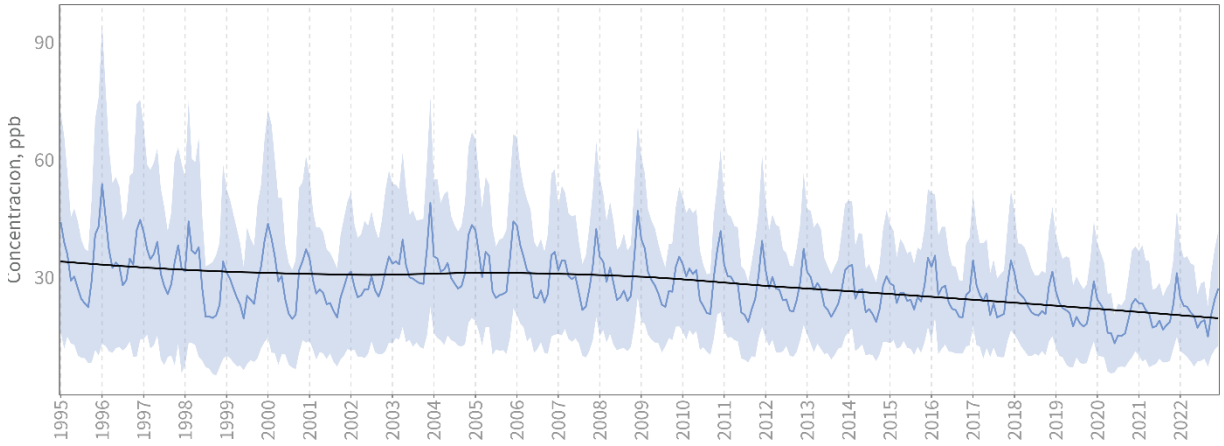


Figura 3.21. Serie de tiempo con promedios mensuales de NO_2 (1995-2022). La línea azul es el promedio de todas las estaciones, la región sombreada azul es la desviación estándar alrededor del promedio y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

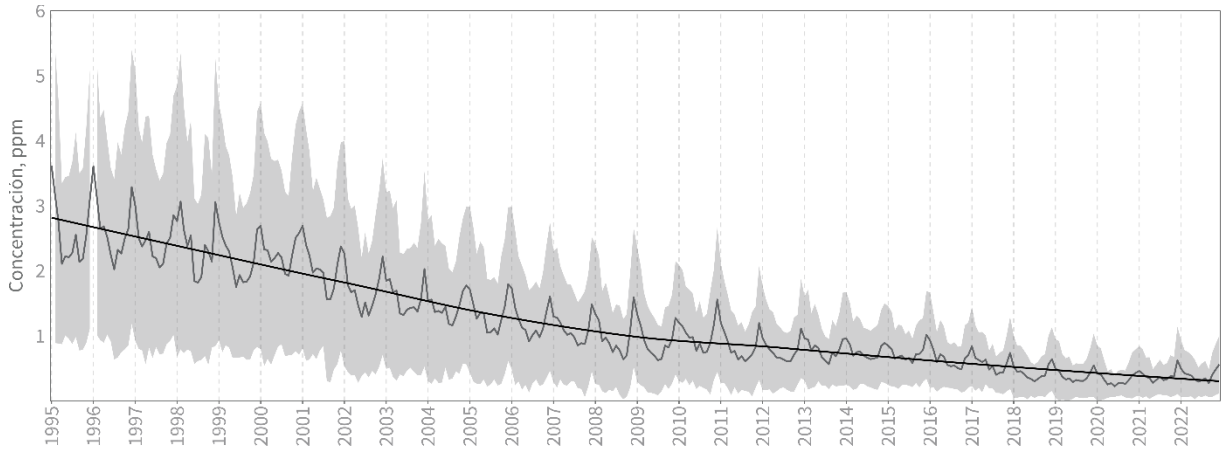


Figura 3.22. Serie de tiempo con promedios mensuales de CO (1995-2022). La línea gris oscuro es el promedio de todas las estaciones, la región sombreada gris es la desviación estándar alrededor del promedio y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

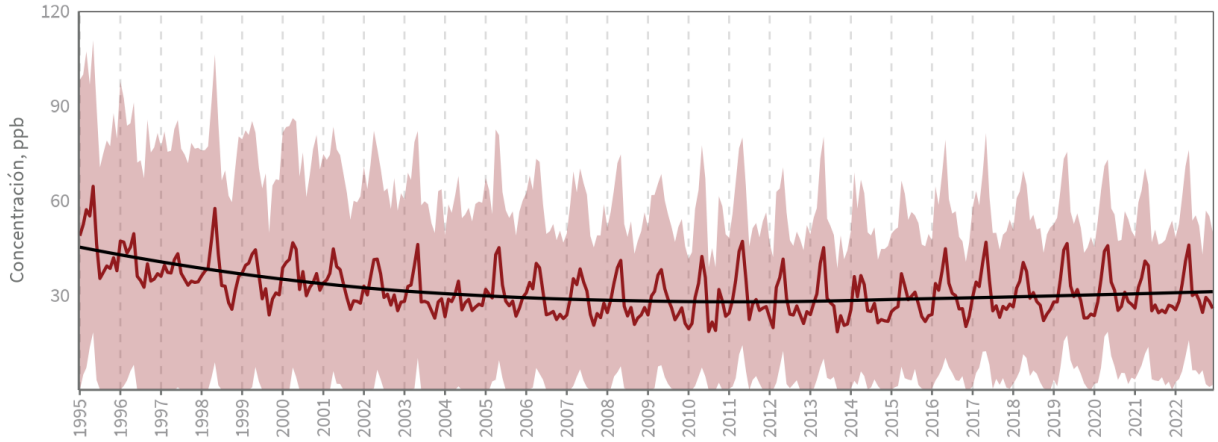


Figura 3.23. Serie de tiempo con promedios mensuales de O_3 (1995-2022). La línea roja es el promedio de todas las estaciones, la región sombreada roja es la desviación estándar alrededor del promedio y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

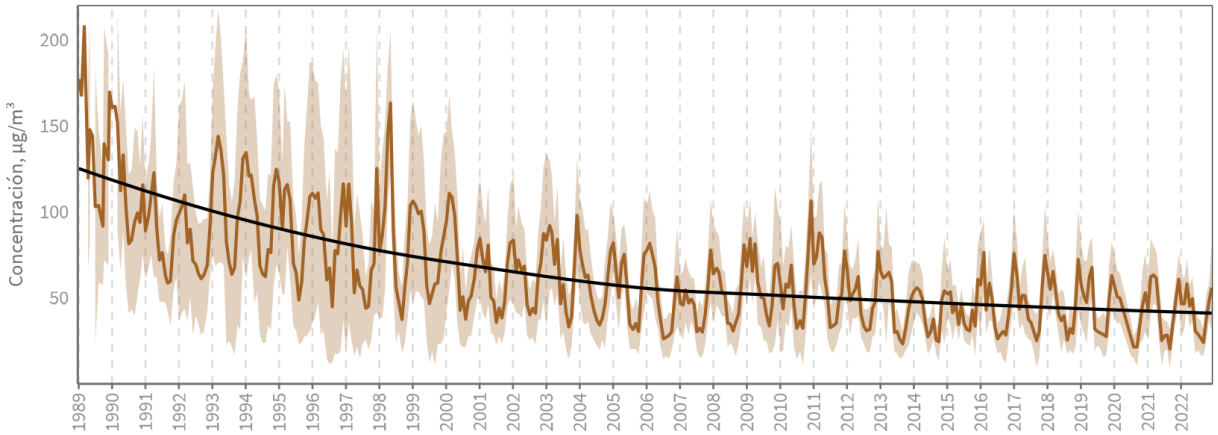


Figura 3.24. Serie de tiempo con promedios mensuales de PST (1995-2022). La línea café es el promedio de todas las estaciones, la región sombreada café es la desviación estándar alrededor del promedio y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

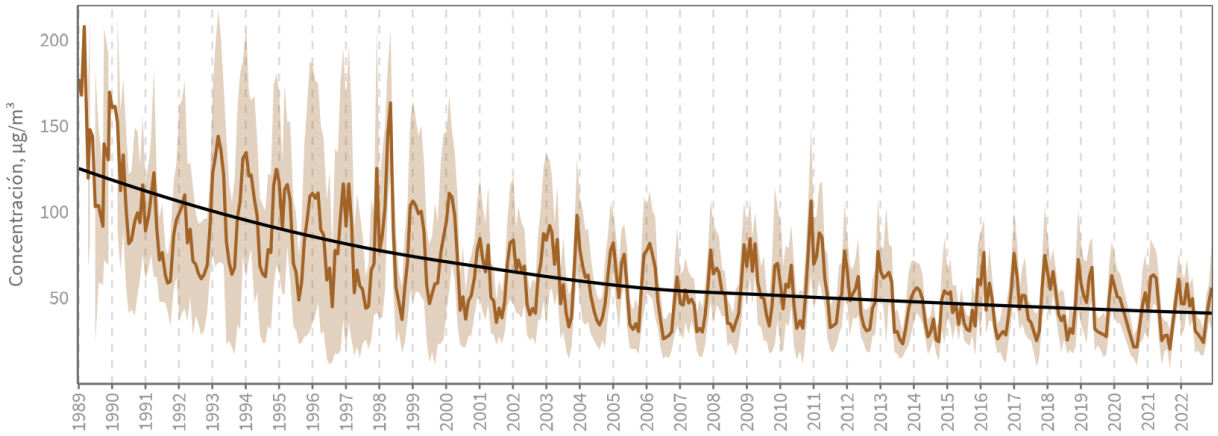


Figura 3.25. Serie de tiempo con promedios mensuales de PM_{10} (1995-2022). La línea café es el promedio de todas las estaciones, la región sombreada café es la desviación estándar alrededor del promedio y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

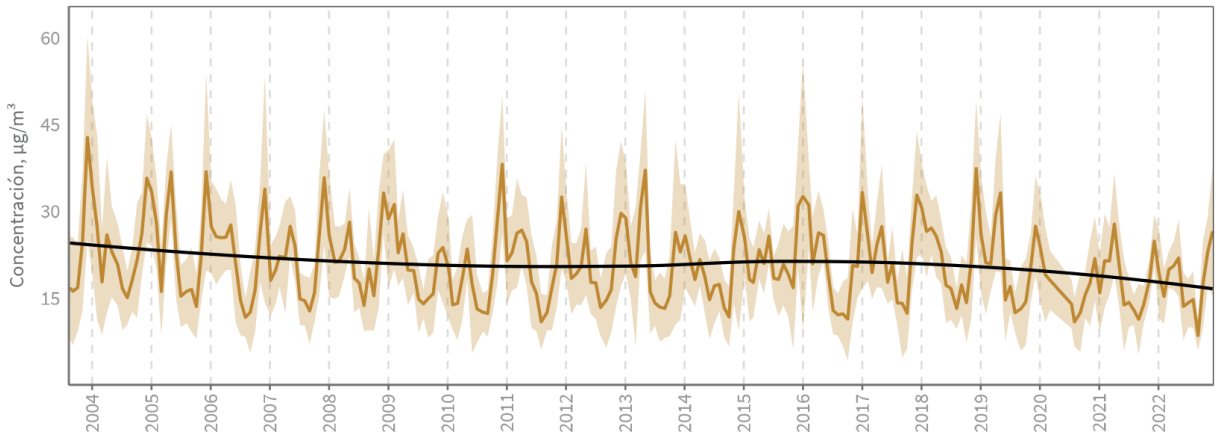


Figura 3.26. Serie de tiempo con promedios mensuales de $PM_{2.5}$ (2004-2022). La línea café es el promedio de todas las estaciones, la región sombreada café es la desviación estándar alrededor del promedio y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

CAPÍTULO 4

Índices de calidad del aire

Índices de Calidad del Aire

El índice de calidad del aire es una herramienta que comunica el estado de la calidad del aire a la población en cada hora del día, informa de manera sencilla e inmediata los riesgos para la salud, se usa una escala numérica o de colores que simplifica la interpretación de las diferentes unidades de medición en los contaminantes y los distintos intervalos de tiempo establecidos en la normatividad. Esta herramienta también tiene como objetivo comunicar sobre los valores altos de contaminación, ya que a partir de la información reportada en las estaciones de monitoreo, informa sobre la peor condición de calidad del aire, es decir, reporta el contaminante que presenta el nivel y el riesgo más alto de la escala. En la ZMCM se ha utilizado el índice de calidad del aire desde la década de los setenta (**Figura 4.1**) y en este capítulo se describe brevemente la evolución del índice, los cambios en los intervalos y los algoritmos para su cálculo. Además, se presenta la evaluación de la calidad del aire para el 2022 a través del **Índice Aire y Salud** (**IAS**), así como el **Índice de Riesgo para Personas Susceptibles** (**IRPS**).

HISTORIA DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE EN LA CIUDAD DE MÉXICO

La evaluación de la calidad del aire en la Ciudad de México inició con los crecientes problemas de contaminación atmosférica en la ciudad. En 1971 se promulga a nivel Federal, la Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental, con el objetivo del mejoramiento, conservación y restauración del ambiente, esta ley presenta el primer intento de protección del aire en sus artículos 10 al 13, pero únicamente se refieren a la Prevención y Control de la Contaminación del Aire, lo cual estaba supervisado por la Secretaría de Salud (Soto, 2010).

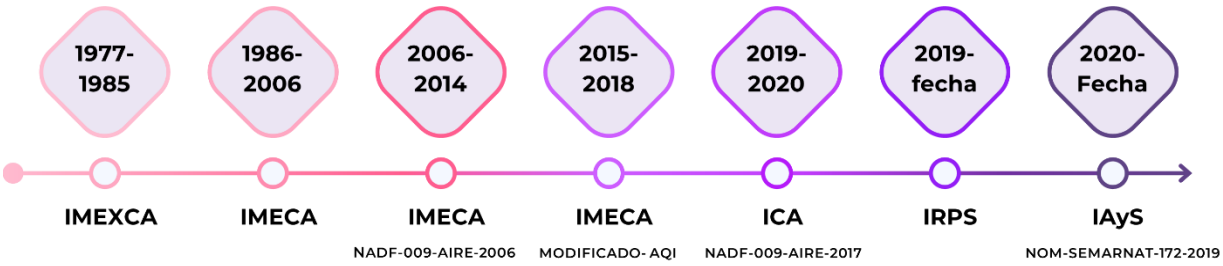


Figura 4.1. Evolución del Índice de Calidad del Aire en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Índice Mexicano de la Calidad del Aire (IMEXCA), 1977 a 1985

El primer índice de calidad de aire se creó a finales de 1977 por la Dirección General de Saneamiento Atmosférico de la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente, y su objetivo fue divulgar periódicamente la calidad del aire de la ciudad, presentando la información de manera sencilla que facilitara el entendimiento para todo el público, sin considerar la concentración de los diferentes contaminantes. Los resultados de este Índice se utilizarían para crear planes de mejora a mediano plazo y para responder ante emergencias por situaciones adversas de contaminación atmosférica (Soto, 2010).

Este primer índice se llamó: **Índice Mexicano de la Calidad del Aire** (**IMEXCA**); para su creación se consideró la información del *Pollutant Standard Index* (PSI), desarrollado en Estados Unidos por los investigadores Ott y Thom. El PSI se creó a partir de otros índices en Estados Unidos: el *Pollutant Index* (PINDEX), el *Oak Ridge Air Quality Index* (ORAQI), el *Mitre Air Quality Index* (MAQUI) y el *Extreme Value Index* (EVI). El PSI consistía en cinco categorías de la condición de la contaminación: "Bueno" (valor del índice: 0 a 50); "Moderado" (51 a 100); "Insalubre (101 a 199); "Muy insalubre" (200 a 299) y "Peligroso" (300 o más); las cuales se usaron para informar a la población (Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente, 1979).

Para la construcción del IMEXCA, se realizó una revisión bibliográfica que ayudó a determinar los contaminantes y los procedimientos para ponderar los efectos en salud; posteriormente se desarrollaron los algoritmos para obtener el valor del Índice aplicable en México. El IMEXCA se clasificó como un índice de tipo estructural $5B_2B$, porque consideraba 5 contaminantes (monóxido de carbono, ozono, dióxido de azufre, partículas suspendidas totales y el producto de SO_2 x PST), los cuales se analizaban con un algoritmo de funciones lineales segmentadas y se reportaba la concentración máxima, así como su descripción que se basaba en los efectos a corto plazo en la salud. El IMEXCA se creó con las mismas cinco categorías y contaminantes del PSI, los puntos de quiebre utilizados en el IMEXCA se presentan en la **Tabla 4.1**.

Tabla 4.1 Puntos de quiebre del IMEXCA

Valor IMEXCA	PST (24 h) µg/m³	PS-FR (24 h) µg/m³	SO_2 (24 h) ppm	PST×SO_2 (24 h) µg/m³	PS-FR×SO_2 (24 h) µg/m³	O_3 (1 h) ppm	CO (8 h) ppm	NO_2 (1 h) ppm
50	175	100	0.07	2.3	1.3	0.07	7	0.2
100	350	190	0.13	8.5	4.5	0.14	14	0.4
200	510	240	0.35	35	17.0	0.27	23	0.8
300	675	275	0.6	75	34.0	0.4	32	1.2
400	835	305	0.8	125	55.0	0.5	41	1.6
500	1000	330	1.0	187	80.0	0.6	50	2.0

PS-FR = Partículas suspendidas fracción respirable

(SMA, 1979)

Para tener confiabilidad y certeza en el desarrollo del índice en la Ciudad de México, se tuvo la asesoría de Wayne Ott, científico de la U.S. EPA que colaboró en la creación del PSI. En el IMEXCA se establecieron algoritmos para los intervalos de concentración por contaminante (**Tabla 4.2**).

Tabla 4.2 Algoritmos del IMEXCA

Contaminante	Intervalo de concentración	Ecuación
PST	350 – 1000	$I_{PST} = 0.6154 * C_{PST} - 114.76$
PS-FR	190 – 240 240 – 275 275 – 330	$I_{PR} = 2 * C_{PR} - 280$ $I_{PR} = 2.8571 * C_{PR} - 485.71$ $I_{PR} = 3.6264 * C_{PR} - 700$
PS-FR + SO_2	4.5 – 34 34 – 80	$I_{R\text{-}SO2} = 6.7275 * C_{R\text{-}SO2} + 75.542$ $I_{R\text{-}SO2} = 4.3369 * C_{R\text{-}SO2} + 155.69$
SO_2	0.16 – 0.6 0.6 – 2.0	$I_{SO2} = 424.95 * C_{SO2} + 47.016$ $I_{SO2} = 441.75 * C_{SO2} + 42.377$
O_3	0.14 - 0.40 0.40 – 0.6	$I_{O3} = 769.23 * C_{O3} + 47.016$ $I_{O3} = 1000 * C_{O3} + 100$
CO	14 - 50	$I_{CO} = 11.111 * C_{CO} - 55.556$
NO_2	0.4 – 2.0	$I_{NO2} = 250 * C_{NO2}$

Donde: **I** = Índice; **C**=Concentración y el subíndice es el contaminante

Es importante mencionar que la primera vez que se publican los criterios que servirán de base para la evaluación de la calidad del aire es después de la creación del IMECA, el 29 de noviembre de 1982 en el Diario Oficial de la Federación (DOF). La principal queja asociada al IMEXCA fue que se interpretó como una copia del PSI, debido a que se creó sin estudios epidemiológicos específicos para los mexicanos y sin normas que proporcionaran los criterios de la calidad del aire.

Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA), 1986 a 2006

En 1982, después de diferentes problemas en las redes de monitoreo, se creó la Subsecretaría de Ecología, dependiente de la Secretaría de Desarrollo Urbano (SEDUE), la cual estaría a cargo del monitoreo y atención a la calidad del aire en el Valle de México. Para 1986, la SEDUE pidió un estudio para un nuevo índice, que fue realizado por la consultora TECNOCONSULT.

Los resultados del estudio derivaron en el denominado Índice Metropolitano de Calidad del Aire (IMECA), el cual estaba fundamentado en dos algoritmos, el primero con los puntos de quiebre y en el segundo consideraba los niveles de contaminación con evidencia de daño significativo a la salud (Soto, 2010). En este índice se utilizó la escala de 50 hasta 500 (Benolol, 1996), las concentraciones correspondientes a cada punto de la escala se muestran en la **Tabla 4.3**.

Tabla 4.3 Puntos de quiebre del IMECA 1986

IMECA	PM_{10} (24 h) µg/m³	SO_2 (24 h) ppm	PST (24 h) µg/m³	O_3 (1 h) ppm	CO (8 h) ppm	NO_2 (1 h) ppm
50	50	0.055	130	0.055	6.5	0.105
100	150	0.11	260	0.11	13.0	0.21
200	350	0.35	445	0.23	20.0	0.66
300	420	0.57	630	0.35	30.0	1.10
400	500	0.78	815	0.48	39.0	1.55
500	600	1.0	1000	0.6	49.0	2.0

Para agilizar el uso y la obtención de los valores del IMECA, desde el 23 de diciembre de 1994 se utilizó un algoritmo simplificado de transformación para los diferentes contaminantes (**Tabla 4.4**). A partir del 1 de julio de 1998, se comenzó a informar el IMECA de los contaminantes para las 24 horas del día.

Tabla 4.4 Algoritmos del IMECA 1986

Contaminante	Intervalo	Ecuación	Algoritmo
Ozono (ppm)	0.0 – 0.11 0.11 – 0.60	$I_{O3} = 909.090909 * C_{O3}$ $I_{O3} = 816.326530 * C_{O3} + 10.20409$	Simplificado
Dióxido de nitrógeno (ppm)	0.0 – 0.21 0.21 – 2.00	$I_{NO2} = 476.190476 * C_{NO2}$ $I_{NO2} = 223.463687 * C_{NO2} + 53.07264$	Simplificado
Dióxido de azufre (ppm)	0.0 – 0.13 0.13 – 1.0	$I_{SO2} = 769.230769 * C_{SO2}$ $I_{SO2} = 459.770114 * C_{SO2} + 40.22989$	Simplificado
Monóxido de carbono (ppm)	0.0 – 11.0 11.0 – 50.0	$I_{CO} = 9.090909 * C_{CO}$ $I_{CO} = 10.256410 * C_{CO} - 12.820512$	Simplificado
Partículas suspendidas totales (µg/m³)	0 – 260 260 – 1000	$I_{PST} = 0.384615 * C_{PST}$ $I_{PST} = 0.540540 * C_{PST} - 40.540541$	Simplificado
PM_{10} (µg/m³)	0 – 50 51 – 350 351 – 420 421 – 500 501 – 600	$I_{PM10} = C_{PM10}$ $I_{PM10} = (1/2) * C_{PM10} + 25$ $I_{PM10} = (10/7)\ C_{PM10} - 300$ $I_{PM10} = (10/8)\ C_{PM10} - 225$ $I_{PM10} = C_{PM10} - 100$	Tipo PSI

Fuente: Informe Calidad del Aire 1998. **I** = Índice; **C**=Concentración y el subíndice es el contaminante

Actualización del Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA), 2007 a 2014

El 29 de noviembre del 2006, la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal publicó una actualización del índice en su Gaceta Oficial, con la creación de la Norma Ambiental del Distrito Federal **NADF-009-AIRE-2006**. El objetivo fue establecer lineamientos del IMECA para ser empleado como una herramienta veraz, sencilla y oportuna para la protección a la salud, que proporciona información sobre el riesgo por la exposición a contaminantes del aire, así como las recomendaciones de protección; además, se buscaba que el IMECA tuviera un proceso transparente para el cálculo de su valor con algoritmos simples; entendible para la población y que se relacione con los riesgos en salud por la exposición a los contaminantes.

En esta norma, la escala del IMECA se clasificó en colores que relacionaban el daño a la salud y el nivel de contaminación, por lo que además de proporcionar el valor numérico del IMECA, también se informa el riesgo a la salud en una escala fácil de identificar, para que la población considere medidas precautorias. Adicionalmente, consideró la publicación de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de calidad del aire en 1994 y la posterior actualización de la NOM de partículas en 2005; por lo tanto, las concentraciones utilizadas para las unidades del IMECA cambiaron de acuerdo a los límites en las NOM vigentes en el momento (**Tabla 4.5**). En cuanto a los algoritmos, fueron analizados y en algunos contaminantes se simplificaron (**Tabla 4.6**).

Tabla 4.5. Intervalos de concentración para la asignación de colores y puntos del índice del IMECA 2006

Calidad del aire/valor	PM_{10} (24 h)	SO_2 (24 h)	$PM_{2.5}$ (24 h)	O_3 (1 h)	CO (8 h)	NO_2 (1 h)
	µg/m³	ppm	µg/m³	ppm	ppm	ppm
Buena: 50	0-60	0.000-0.065	0-15.4	0.000-0.055	0.00--5.50	0.000-0.105
Regular: 100	61-120	0.066-0.130	15.5-40.4	0.056-0.110	5.51-11.00	0.106-0.210
Mala: 150	121-220	0.131-0.195	40.5-65.4	0.111-0.165	11.01-16.50	0.211-0.315
Muy Mala: 200	221-320	0.196-0.260	65.5-150.4	0.166-0.220	16.51-22.00	0.316-0.420
Ext. Mala >200	>320	>0.260	>150.4	>0.22	>22.00	>0.420

Tabla 4.6. Algoritmos del IMECA 2006

Contaminante	Intervalo concentración	Ecuación de transformación	Ecuación simplificada
Ozono (ppm)	0.00 a 0.220	$I_{O3} = 100/0.11 * C_{O3}$	Simplificado
Dióxido de nitrógeno (ppm)	0.00 a >0.42	$I_{NO2} = 100/0.21 * C_{NO2}$	Simplificado
Dióxido de azufre (ppm)	0.00 a >0.26	$I_{SO2} = 100/0.13 * C_{SO2}$	Simplificado
Monóxido de carbono (ppm)	0.00 a >22.0	$I_{CO} = 100/11 * C_{CO}$	Simplificado
PM_{10} (µg/m³)	0 – 120 221 – 320 >320	$I_{PM10} = 5/6 * C_{PM10}$ $I_{PM10} = 0.5 * C_{PM10} + 40$ $I_{PM10} = 5/8 * C_{PM10}$	Simplificado
$PM_{2.5}$ (µg/m³)	0 – 15.4 15.5 – 40.4 40.5 – 65.4 65.5 – 150.4 > 150.4	$I_{PM25} = C_{PM25} * 50/15.4$ $I_{PM25} = (49/24.9) * C_{PM25} + 20.50$ $I_{PM25} = (49/24.9) * C_{PM25} + 21.30$ $I_{PM25} = (49/84.9) * C_{PM25} + 113.20$ $I_{PM25} = C_{PM25} * 201/150.5$	Tipo PSI

Modificación al IMECA en 2014 para O_3, PM_{10} y $PM_{2.5}$, finales de 2014 a 2018

En octubre de 2014, entraron en vigor modificaciones en las normas de ozono (NOM-020-SSA1-2014) y partículas (NOM-025-SSA1-2014), por lo que fue necesario ajustar los puntos de quiebre para estos contaminantes. El IMECA se adaptó al algoritmo del "*Air Quality Index*" (AQI) de la U.S. EPA, el índice de 50 puntos utiliza el valor de exposición a largo plazo (crónica) que se indica en la NOM para cada contaminante. El índice de 100 puntos se asignó al nuevo límite de exposición de corto plazo (aguda) de las NOM y para los demás intervalos se utilizan los puntos de quiebre establecidos en el CFR 40 de la U.S. EPA (**Tabla 4.7**). El algoritmo del AQI que se utilizó para los tres contaminantes (O_3, PM_{10} y $PM_{2.5}$) es el siguiente:

$$Índice = \left(k \times (C - BP_{LO})\right) + I_{Lo} \qquad \textit{Ecuación 1}$$

$$k = \frac{I_{Hi} - I_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}} \qquad \textit{Ecuación 2}$$

Donde:

Índice = valor del índice para el contaminante deseado (O_3, PM_{10}, $PM_{2.5}$), calculado con la *Ecuación 1*.
C= concentración redondeada del contaminante
k= constante de proporcionalidad calculada con la *Ecuación 2*
BP_{Hi} =valor del punto de corte que es **mayor o igual** a la concentración a evaluar *C*.
BP_{Lo} =valor del punto de corte que es **menor o igual** a la concentración a evaluar C.
I_{Hi} = índice que corresponde al valor de BP_{Hi}
I_{Lo} = índice que corresponde al valor de BP_{Lo}

Tabla 4.7 Puntos de quiebre del AQI para O_3, PM_{10} y $PM_{2.5}$ a partir del 28 de octubre del 2014

Calidad del aire	Valor del índice	PM_{10} (24 h)	$PM_{2.5}$ (24 h)	O_3 (1 h)
		µg/m³	µg/m³	ppm
Buena	0 - 50	0 – 40	0.0 – 12.0	0.00 – 0.070
Regular	51 -100	41 – 75	12.1 – 45.0	0.071 – 0.095
Mala	101 - 150	76 – 214	45.1 – 97.4	0.096 – 0.154
Muy mala	151 - 200	215 – 354	97.5 – 150.4	0.155 – 0.204
Extremadamente. mala	201 - 300	355 – 424	150.5 – 250.4	0.205 – 0.404
Peligrosa	301 – 400	425 – 504	250.5 – 350.4	0.405 – 0.504
	401 – 500	505 - 604	350.5 – 500.4	0.505 – 0.604

Para los contaminantes CO, NO_2 y SO_2, no se modificó el cálculo ni se adaptó el AQI, debido a que las NOM de estos contaminantes no tuvieron cambios, por lo tanto, los intervalos y algoritmos de cálculo permanecieron iguales (**Tablas 4.5** y **4.6**).

Índice de Calidad del Aire (ICA), 2019 a 2020

A finales del año 2018 se publicó la actualización de la Norma Ambiental de la Ciudad de México, la **NADF-009-AIRE-2017.** Este índice consideró los cambios de los límites las NOM para el dióxido de azufre (NOM-022-SSA1-2010), además de las modificaciones del 2014 para ozono, PM_{10} y $PM_{2.5}$. La importancia de esta actualización fue la publicación del índice para $PM_{2.5}$, las cuales se consideran de los principales contaminantes con mayor riesgo en salud a nivel mundial. En esta NADF-009-AIRE-2017, se le denominó **Índice de Calidad del Aire** y se cambió la metodología para su obtención, con el cálculo de la pendiente de la línea entre los rangos de índices y sus intervalos de concentración, a través del uso de una constante de proporcionalidad (**Tabla 4.8**).

Tabla 4.8. Puntos de quiebre Índice de Calidad del Aire 2017

Unidad/calidad del aire	PM_{10} (24 h)	SO_2 (24 h)	$PM_{2.5}$ (24 h)	O_3 (1 h)	CO (8 h)	NO_2 (1 h)
	µg/m³	ppm	µg/m³	ppm	ppm	ppm
Buena: 0 - 50	0 – 40	0.00 – 0.025	0.0 – 12.0	0.00-0.070	0.00 - 5.5	0.00 – 0.105
Regular: 51 -100	41 – 75	0.026 – 0.110	12.1 – 45.0	0.071-0.095	5.6 – 11.0	0.106 – 0.210
Mala: 101 - 150	76 – 214	0.111 – 0.207	45.1 – 97.4	0.096-0.154	11.1 – 13.0	0.211 – 0.430
Muy Mala: 151 - 200	215 – 354	0.208 – 0.304	97.5 – 150.4	0.155 -0.204	13.1 – 15.4	0.431 – 0.649
Ext. Mala: 201 - 300	355 – 424	0.305 – 0.604	150.5 – 250.4	0.205 – 0.404	15.5 – 30.4	0.650 – 1.249
Peligrosa: 301 – 400	425 – 504	0.605 – 0.804	250.5 – 350.4	0.405 – 0.504	30.5 – 40.4	1.250 – 1.649
Peligrosa: 401 – 500	505 - 604	0.805 – 1.004	350.5 – 500.4	0.505 – 0.604	40.5 – 50.4	1.650 – 2.049

Los cálculos para reportar el ICA están basados en la obtención de la constante de proporcionalidad ***k***:

$$k = \frac{Isup - Iinf}{PCsup - PCinf} \qquad \textit{Ecuación 3}$$

Donde:

k = Constante de proporcionalidad, en ppm^{-1} para O_3, NO_2, SO_2 y CO, mientras que para PM_{10} y $PM_{2.5}$, en $m^3/\mu g$.

PC_{sup} = Concentración del punto de corte superior o igual a la concentración a evaluar, en ppm para O_3, NO_2, SO_2 y CO, mientras que para PM_{10} y $PM_{2.5}$, es en $\mu g/m^3$.

PC_{inf} = Concentración del punto de corte inferior o igual a la concentración a evaluar, en ppm para O_3, NO_2, SO_2 y CO, mientras que para PM_{10} y $PM_{2.5}$, es en $\mu g/m^3$.

I_{sup} = Índice de la PC_{sup}, adimensional.

I_{inf} = Índice de la PC_{inf}, adimensional.

Una vez que se obtiene el valor de la constante, entonces se procede a calcular el Índice de calidad del aire, a través de la siguiente ecuación:

$$Índice = \left(k\ x\ \left[C_{obs} - PC_{inf}\right]\right) + Iinf \qquad \textit{Ecuación 4}$$

Donde:

Índice = Índice de Calidad del Aire

C_{obs} = Concentración medida del contaminante en ppm para O_3, NO_2, SO_2 y CO, y en µg/m^3 para PM_{10} y $PM_{2.5}$.

Índice de Calidad del Aire y Salud (IAS), 2020 a la fecha

En 2019 se publicó la Norma Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019, que establece los lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de calidad del Aire y Riesgos a la Salud, también llamado Índice AIRE y SALUD (IAS), con el objetivo de que sea homologado en todo el territorio nacional para difundir de manera clara, oportuna y continua, el estado de la calidad del aire, los riesgos asociados a la exposición a los contaminantes atmosféricos y las medidas de protección recomendadas para reducir la exposición.

Esta NOM tiene como objetivo homologar procedimientos en las ciudades que ya contaban con un índice y en las que no, ya podrían publicarlo en beneficio de la población que se expone a diferentes niveles de contaminación en todo el país. El IAS está relacionado a la salud, por lo que complementó al Índice de Calidad del Aire, este último se mantuvo para la activación de Contingencias Atmosféricas (SEDEMA, 2022).

Una de las características principales del IAS, es que consideró un nuevo indicador, el promedio móvil ponderado de 12 horas para PM_{10} y $PM_{2.5}$, en vez del promedio de 24 horas utilizado anteriormente. Este nuevo indicador se le conoce como *NowCast* y fue desarrollado por la U.S. EPA para informar a la población con mayor oportunidad sobre los riesgos de la exposición a niveles altos de partículas.

El IAS clasifica la concentración de los contaminantes dentro de rangos asociados a los riesgos en salud, las 5 categorías del IAS son: **Buena**, **Aceptable**, **Mala**, **Muy Mala** y **Extremadamente Mala**. La calidad del aire Aceptable está relacionada con el límite de las NOM vigentes en 2019. El IAS utiliza el mismo sistema de colores que el Índice de Calidad del Aire y las recomendaciones de salud se presentan en la **Tabla 4.9**.

Tabla 4.9 Recomendaciones en el Índice Calidad del Aire y Riesgos a la Salud (IAS) 2019

Calidad del Aire	Nivel de riesgo asociado	Recomendaciones	
		Grupos sensibles	Población en general
Buena	Bajo	Disfruta las actividades al aire libre.	
Aceptable	Moderado	Considerar reducir las actividades físicas vigorosas al aire libre.	Disfruta las actividades al aire libre
Mala	Alto	Evita las actividades físicas (moderadas y vigorosas) al aire libre	Reduce las actividades físicas vigorosas al aire libre.
Muy Mala	Muy Alto	No realices actividades al aire libre. Acudir al médico si se presentan síntomas respiratorios o cardiacos.	Evita las actividades físicas moderadas y vigorosas al aire libre.
Extremadamente Mala	Extremadamente Alto	Permanece en espacios interiores. Acudir al médico si se presentan síntomas respiratorios o cardiacos.	

El IAS ya no tiene una escala numérica como el Índice de Calidad del Aire (0 al 500), sino que relaciona directamente la concentración de cada contaminante con la categoría de calidad del aire correspondiente. Actualmente en la Ciudad de México se reportan ambos, el ICA y el IAS debido a que se consideró necesario para la transición entre índices y para la compresión de la población, la cual estaba acostumbrada a la escala numérica del ICA.

Índice de Riesgo para personas Susceptibles (IRPS), finales de 2018 a la fecha

En 2017, la SEDEMA en colaboración con el Instituto Marron de la Universidad de Nueva York, desarrolló el **Índice de Riesgo para Personas Susceptibles** (**IRPS**) con el objetivo de mejorar la comunicación de riesgos a la salud derivados de la exposición a contaminantes. La construcción del IRPS se basó en el método del índice de Canadá (Air Quality Health Index - AQHI), donde el uso del AQHI ha disminuido las visitas a urgencias relacionadas con asma. En el caso del IRPS, se usaron datos de salud y contaminantes registrados en la CDMX, con lo que se desarrolló un modelo para obtener los coeficientes por contaminante y así, calcular el índice. Para mayor detalle sobre la elaboración del IRPS, se puede consultar el artículo de Cromar et al., 2021 y el informe anual 2019 (SEDEMA, 2022).

El IRPS está dirigido especialmente a **personas susceptibles** (niños, adultos mayores, personas con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, entre otras) que pueden presentar síntomas incluso a niveles bajos de concentración. El IRPS es un índice multi contaminante que contempla los riesgos a la salud por la exposición a O_3, $PM_{2.5}$ y NO_2, lo que es representativo de la mezcla compleja de aire de la CDMX, la elección de contaminantes fue derivado de los resultados del análisis por SEDEMA-Instituto Marron, NYU.

En la **Figura 4.2** se muestra el proceso para la obtención del valor del índice diariamente, el cual se publica para el día actual y el siguiente, este último con los datos generados por el Sistema de Pronóstico de Calidad del Aire de la CDMX (AQFS-CDMX). El IRPS proporciona un valor al día para toda la CDMX asociado directamente al riesgo en salud por la exposición los tres contaminantes mencionados. Tiene una escala numérica de 0 a 10+, donde el cero representa la ausencia de riesgos y el 10+, corresponde a un "Riesgo muy alto" (**Figura 4.3**).

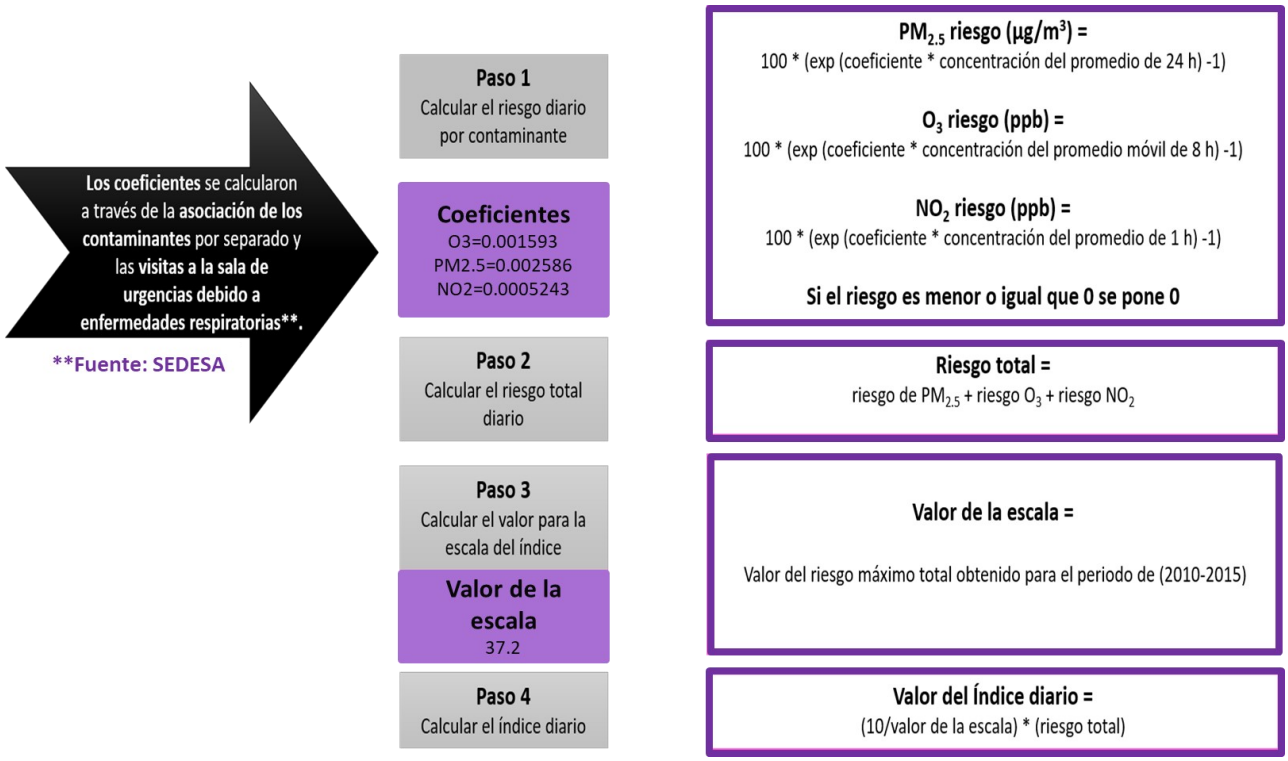


Figura 4.2. Diagrama de los pasos para calcular el Índice de Riesgo para personas susceptibles (IRPS).

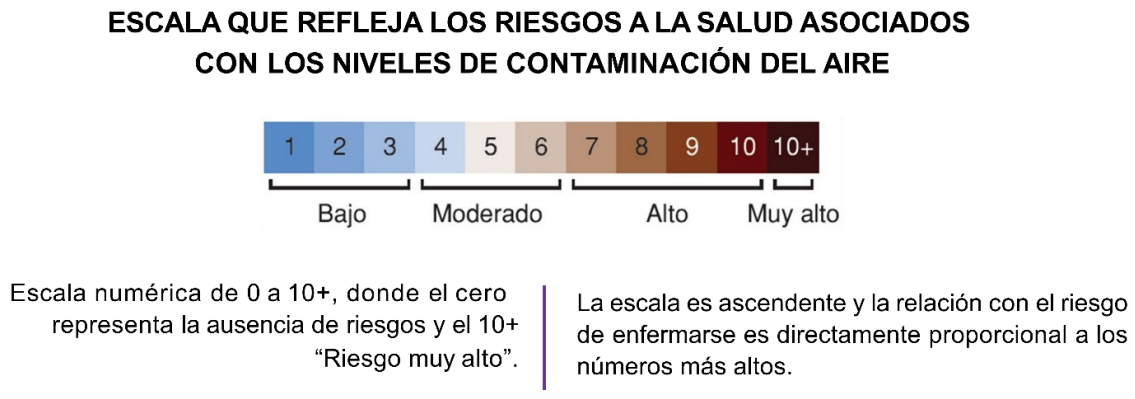


Figura 4.3. Escala numérica del IRPS de México.

El valor del IRPS se comunica desde un día antes con datos del AQFS-MexDF, con el objetivo de que las personas tengan tiempo de planear sus actividades al aire libre y reduzcan su exposición. Debido a la heterogeneidad de las personas, unas más sensibles que otras, se recomienda que cada uno defina su nivel de riesgo ("Conoce tu número") y, con base en éste, modifique su comportamiento para reducir su exposición. Es importante mencionar que el IRPS **complementa y no sustituye a otros índices** como el Índice de Calidad del Aire de la CDMX, así como el Índice AIRE y SALUD (IAS).

EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE Y SALUD (IAS) EN 2022

En 2022, se presentaron **126 días limpios** (categorías Buena y Aceptable del IAS), en los que ningún contaminante superó su NOM, esto corresponde al 35 % de los días del año, que comparado con 2021, tuvo un decremento del 2 % (9 días). Por el contrario, se registraron 239 días con calidad del aire Mala, Muy Mala o Extremadamente Mala del índice AIRE y SALUD. Para el conteo, se utilizó el valor máximo del día sin considerar la estación, contaminante o indicador (promedio horario, promedio 24 h, etc.) que fue registrado, esto debido a un carácter preventivo que busca mantener una situación de alerta en la región. Estas consideraciones para realizar el conteo se hacen con la finalidad de analizar el comportamiento anual del IAS (**Figura 4.4**).

Figura 4.4. Comportamiento del Índice AIRE y SALUD para 2022 considerando todos los contaminantes.

En los 239 días en los que, al menos un contaminante superó el límite de su NOM, 167 días corresponden a la categoría Mala, 60 de Muy Mala y 12 a Extremadamente Mala, en esta última categoría se distribuyeron cinco días en mayo, cuatro durante abril, mientras que en marzo, junio y noviembre se registró un día en cada mes; además todos corresponden al O_3, en sus indicadores del promedio móvil de 8 h y promedio horario, este último registró máximos entre 144 y 172 ppb, con un promedio de 157 ppb para esos 12 días contabilizados en categoría Extremadamente Mala.

En el comportamiento mensual del IAS, septiembre tuvo mejor calidad del aire, con 22 días limpios y sólo 8 en categoría Mala. Por el contrario, abril y mayo registraron menos días limpios, con uno y dos días respectivamente, por lo tanto, presentaron más días en las categorías de calidad del aire Muy Mala a Extremadamente Mala, con un total de 17 en abril y 18 en mayo.

Para el análisis del IAS por contaminante, el conteo del ozono es combinado, ya que se reporta la categoría más alta registrada entre los indicadores del promedio horario y el móvil de 8 h, por lo tanto, el O_3 registró 143 días limpios (categoría Buena - Aceptable) y 222 días sucios, de los cuales fueron 150 en Mala, 60 en Muy Mala y 12 en Extremadamente Mala. En los seis días que se declararon contingencias por ozono (máximo horario > 154 ppb), el promedio móvil de 8 h alcanzó categoría Extremadamente Mala, debido a que se presentaron más de tres horas con valores superiores a 140 ppb en el máximo horario. Los meses con mayor número de días limpios para ozono fueron septiembre con 22, enero y diciembre, ambos con 17 días. Mientras que abril y mayo registraron la peor calidad del aire con 29 días en categorías Mala a Extremadamente Mala (**Figura 4.5a**).

En el IAS de $PM_{2.5}$ se utiliza el promedio de 24 h, esto se consideró debido a que se compara con el límite de la NOM, por lo tanto, el conteo de días se realizó con este indicador y no con el promedio ponderado de 12 horas (*NowCast*), el cual tiene como único objetivo alertar a la población si hay concentraciones altas al momento. El IAS de $PM_{2.5}$ tuvo 355 días limpios en categorías Buena y Aceptable, las cuales están por debajo del límite de la NOM. Por el contrario, se registraron 10 días sucios, de los cuales 9 fueron en Mala y 1 en Muy Mala, que fue el primero de enero, ocasionado por el uso de pirotecnia. En el análisis por mes, enero, abril, mayo y diciembre presentaron la peor calidad del aire para este contaminante ya que registraron mayor cantidad de días en categorías Mala y Muy Mala. Los meses de abril y mayo presentaron dos y tres días en la categoría Mala, respectivamente; debido a que este contaminante contiene partículas secundarias y en la época seca caliente (marzo-mayo) se favorece su formación. En diciembre se registraron 3 días con Mala calidad del aire, que ocurren por la presencia de inversiones térmicas, este fenómeno provoca estancamiento de contaminantes y mayor estabilidad atmosférica debido a las bajas temperaturas de la temporada **(Figura 4.5b**).

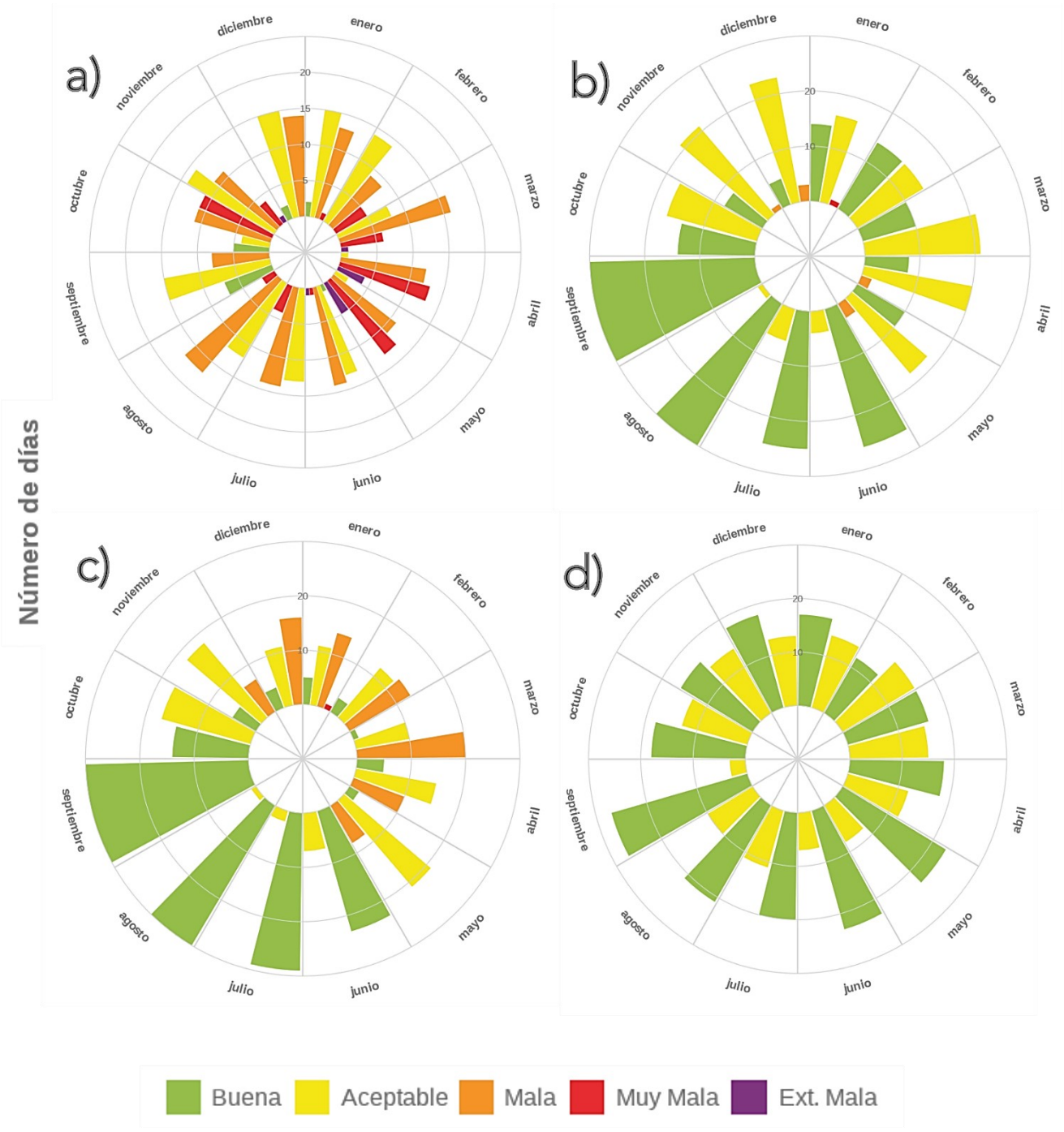


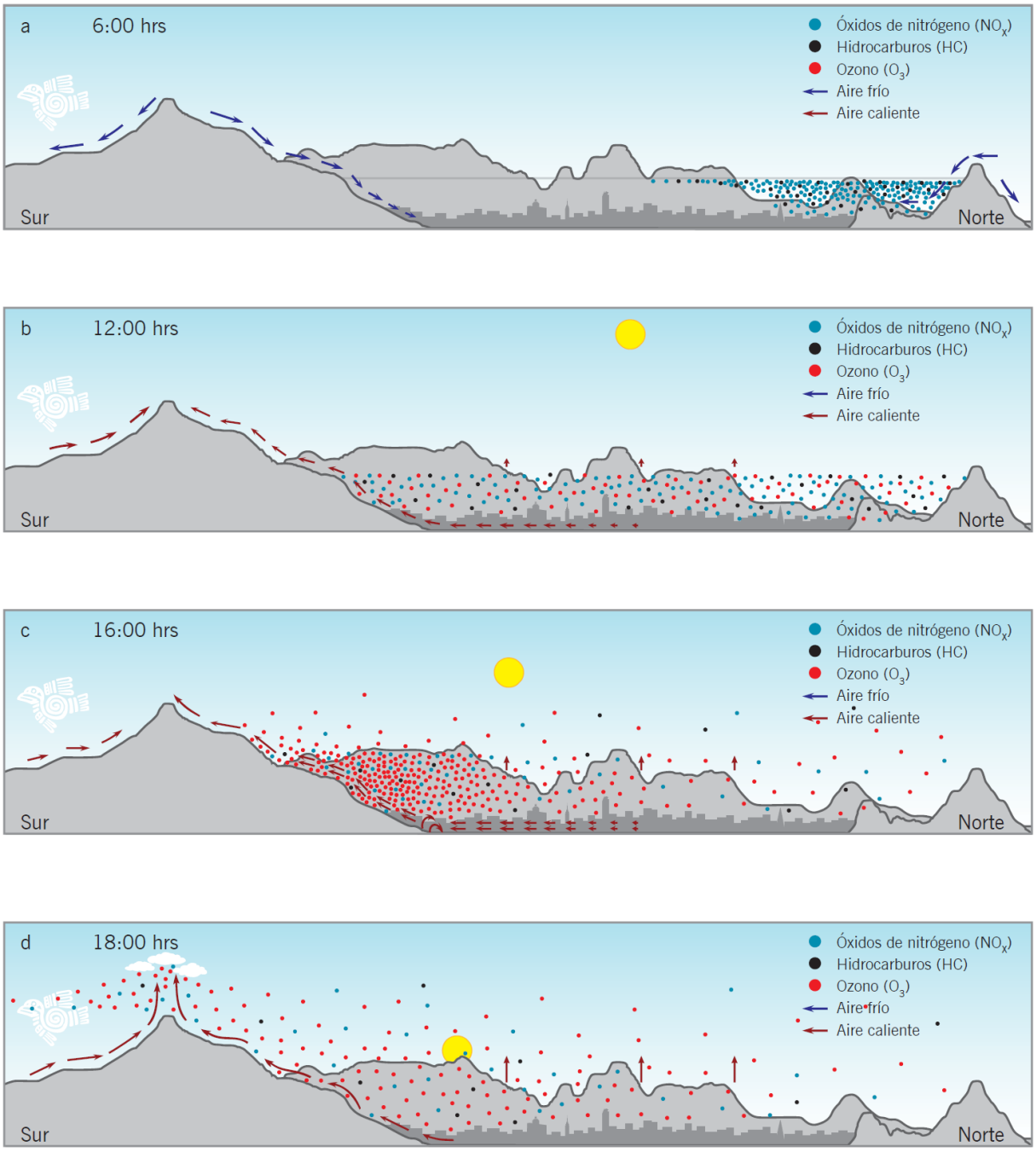
Figura 4.5. Comportamiento del Índice AIRE y SALUD para: **a)** O_3, **b)** $PM_{2.5}$, **c)** PM_{10} y **d)** SO_2

El IAS en las partículas PM_{10}, contabilizado con el promedio de 24 h debido a la comparación con el límite y métrica de la NOM, registró 276 días limpios, es decir, en categorías Buena y Aceptable; mientras que 89 días fueron sucios, de los cuales 88 estuvieron en Mala y 1 de Muy Mala, que también fue el primero de enero, consecuencia de la quema de fuegos pirotécnicos. Los meses de las temporadas seca fría (noviembre a febrero) y seca caliente (marzo a mayo), son los que registraron más días con Mala calidad del aire, esto se debe principalmente a las tolvaneras que se presentaron en febrero y marzo, así como la estabilidad atmosférica y las inversiones térmicas que provocaron el estancamiento de los contaminantes. Durante marzo, diciembre y enero se tuvo la peor calidad del aire en PM_{10}, con 20, 16 y 15 días, respectivamente, los cuales superaron el límite NOM, por lo tanto, se clasificaron en Mala y Muy Mala calidad del aire. Es importante resaltar que durante la temporada de lluvia se realiza el lavado atmosférico, esto normalmente se presenta de junio a octubre, por lo que son los meses más limpios; sin embargo, en 2022 solamente septiembre registró días con Buena calidad del aire con un total de 30 (**Figura 4.5c**).

Por último, se analizó el índice de SO_2, el cual se contabilizó con la métrica del promedio de 24 h y registró 365 días limpios. A nivel mensual, septiembre tuvo el máximo de días en categoría Buena con 27, seguido de mayo y junio, ambos con 23 días. Este contaminante con el indicador del promedio de 24 h no rebasa el límite de su NOM (**Figura 4.5d**).

En la comparación por entidad federativa, la CDMX registró **148 días limpios,** mientras que el EDOMEX tuvo **176 días,** esto representa un **16 %** más de días limpios. A nivel contaminante, el ozono predomina en el conteo de días sucios, especialmente en la CDMX, esto es debido a las características fisiográficas del Valle (rodeado de montañas al sur) y a la dirección del viento dominante (de norte a sur), por lo que es frecuente que las emisiones de los precursores del O_3 (NOx y COV), generadas en toda la ciudad, se acumulen en la zona sur del valle (**Figura 4.6**) y, en consecuencia, la CDMX siempre tiene más problemas de O_3 en comparación al EDOMEX.

En el caso de las partículas sucede lo contrario, ya que el EDOMEX normalmente registra menos días limpios que la CDMX. En 2022, las PM_{10} tuvieron **276 días** limpios en comparación de **349 días** para la CDMX, lo que representó un **21 %** más de días limpios. Para las $PM_{2.5}$ fue diferente, el EDOMEX registró **361 días limpios**; mientras que la CDMX obtuvo **355 días**, esta diferencia representa un **2 %**, esto es debido a la composición de las $PM_{2.5}$, que están constituidas por **partículas de origen secundario** en más del 50 % de las $PM_{2.5}$ y, similar a la formación de O_3, estas se generan a partir de contaminantes primarios mediante reacciones químicas que se favorecen con la radiación solar y son transportadas hacia la CDMX por acción del viento.



Fuente: SIMAT, influencia de la fisiografía del Valle de México en el comportamiento del ozono (O_3), http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/simat-cartel-comportamiento-o3.pdf

Figura 4.6. a) En la mañana, con el inicio de actividades urbanas, las emisiones de hidrocarburos y NOx se acumulan sobre la ciudad y están retenidas dentro de la inversión térmica. **b)** En el transcurso del día, cuando el sol calienta gradualmente el suelo, se favorece un flujo desde el valle hacia las montañas, que inicia con una débil corriente de aire que traslada los contaminantes hacia las montañas del sur y poniente, durante este proceso, la energía del sol activa las reacciones fotoquímicas que generan O_3. **c)** La presencia de estabilidad atmosférica en capas atmosféricas superiores provoca que el intercambio vertical de masas de aire sea lento y se acumulan los contaminantes al pie de las montañas, lo cual incrementa considerablemente el O_3. **d)** Por último, el calentamiento del suelo por la tarde refuerza el movimiento horizontal y vertical del viento, lo que favorece la rápida dispersión de la contaminación.

En la comparación del Índice AIRE y SALUD de 2022 con el año 2021 (**Tabla 4.10**), la categoría Mala de ozono (promedio horario) tuvo un incremento de 18 días (10 %) en la CDMX, a diferencia del EDOMEX, donde registró un decremento de 12 días (9 %). El incremento de días en ozono, está relacionado con el aumento de actividad por el término de la pandemia COVID-19 y con las condiciones meteorológicas en la época seca-caliente (marzo a mayo), que ocasionaron temperaturas elevadas, estabilidad atmosférica, intensa radiación solar por falta de nubosidad, lo cual favorece la formación del contaminante

En las PM_{10}, la CDMX y el EDOMEX tuvieron reducciones de 5 (24 %) y 11 días (11 %), respectivamente; mientras que en las $PM_{2.5}$, la CDMX registró los mismos 10 días que en 2021 (0% de cambio); por el contrario, el EDOMEX presentó un decremento de 7 días (78 %) con respecto al año pasado.

Tabla 4.10. Comparación del número de días con categoría MALA o superior del 2021 al 2022 por contaminante y entidad

Contaminante	Entidad	Número de días con calidad del aire Mala		Diferencia de días (2021-2020)	Porcentaje de cambio (%)
		2021	2022		
Ozono (O_3)	CDMX	179	197	18	10 ↑
	EDOMEX	131	119	-12	-9 ↓
PM_{10}	CDMX	21	16	-5	-24 ↓
	EDOMEX	100	89	-11	-11 ↓
$PM_{2.5}$	CDMX	10	10	0	0 —
	EDOMEX	9	2	-7	-78 ↓

EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE RIESGO PARA PERSONAS SUSCEPTIBLES (IRPS) EN 2022

El IRPS es un **índice multicontaminate** y proporciona un valor diario para la CDMX, para su obtención se requiere el máximo del promedio móvil de 8 h para O_3; el promedio de 24 h de $PM_{2.5}$ y el máximo horario del día para NO_2 (**Figura 4.2**). La combinación de tres diferentes contaminantes en este índice hace que el valor de su escala sea más protector, ya que es una mezcla que se encuentra en el aire que se respira. El IRPS refleja consistentemente las variaciones de calidad del aire, especialmente en O_3 y $PM_{2.5}$, ya que el NO_2, practicamente tiene calidad del aire Buena y en muy pocos dias, estuvo en la categoría Aceptable del IAS. Es importante resaltar que, cuando la combinación de los contaminantes presenta calidad del aire Muy Mala en el IAS, el IRPS señala valores superiores a 6 en su escala (**Figura 4.7**).

En 2022, el IRPS obtuvo 66 días en riesgo Bajo (1 a 3 de la escala), que fueron 16 días menos que en 2021, en los que la mayoría tuvieron IRPS = 3 y septiembre fue el mes con más días en este nivel con un total de 20. El riesgo Moderado (IRPS de 4 a 6) contabilizó 266 días, los cuales son 17 días más que el año pasado, con marzo, julio y dicembre con mayor cantidad de días en este nivel de riesgo con 28, 28 y 27 días, respectivamente. Por último el riesgo Alto (7 a 10 de la escala) presentó un total de 33 días, un día menos que 2021; los meses con más días con este IRPS fueron mayo con 14 y abril con 8, los cuales no registraron ningún día con riesgo Bajo. Se puede observar que el IRPS logró identificar los días más complicados de contaminación ocasionados por O_3 y $PM_{2.5}$.

Los días más críticos fueron el 1ero de enero con el IRPS más alto del 2022 con 10, y aunque no se alcanzó la contingencia ese día, el ozono y las partículas registraron concentraciones altas. El promedio de 8 h de O_3 fue de 107 ppb y el promedio de 24 h de $PM_{2.5}$ fue de 97 $\mu g/m^3$, por lo que la combinación del ambos contaminantes ocasionó un IRPS de 10 en la escala. En cuatro días que se alcanzó el valor de IRPS = 9, coincidió con la activación de las contingencias por ozono del 5, 20 y 21 de mayo, así como el 12 de noviembre. El resto de las contingencias de ozono del 2022 registraron un IRPS de 7; es importante mencionar que también se presentaron IRPS = 7 en días cercanos a las contingencias o cuando el IAS registró calidad del aire Extremadamente Mala (13 días en total), en los que uno tuvo IRPS de 7, seis días con valor de 8 y cuatro con IRPS = 9 (**Figura 4.7**).

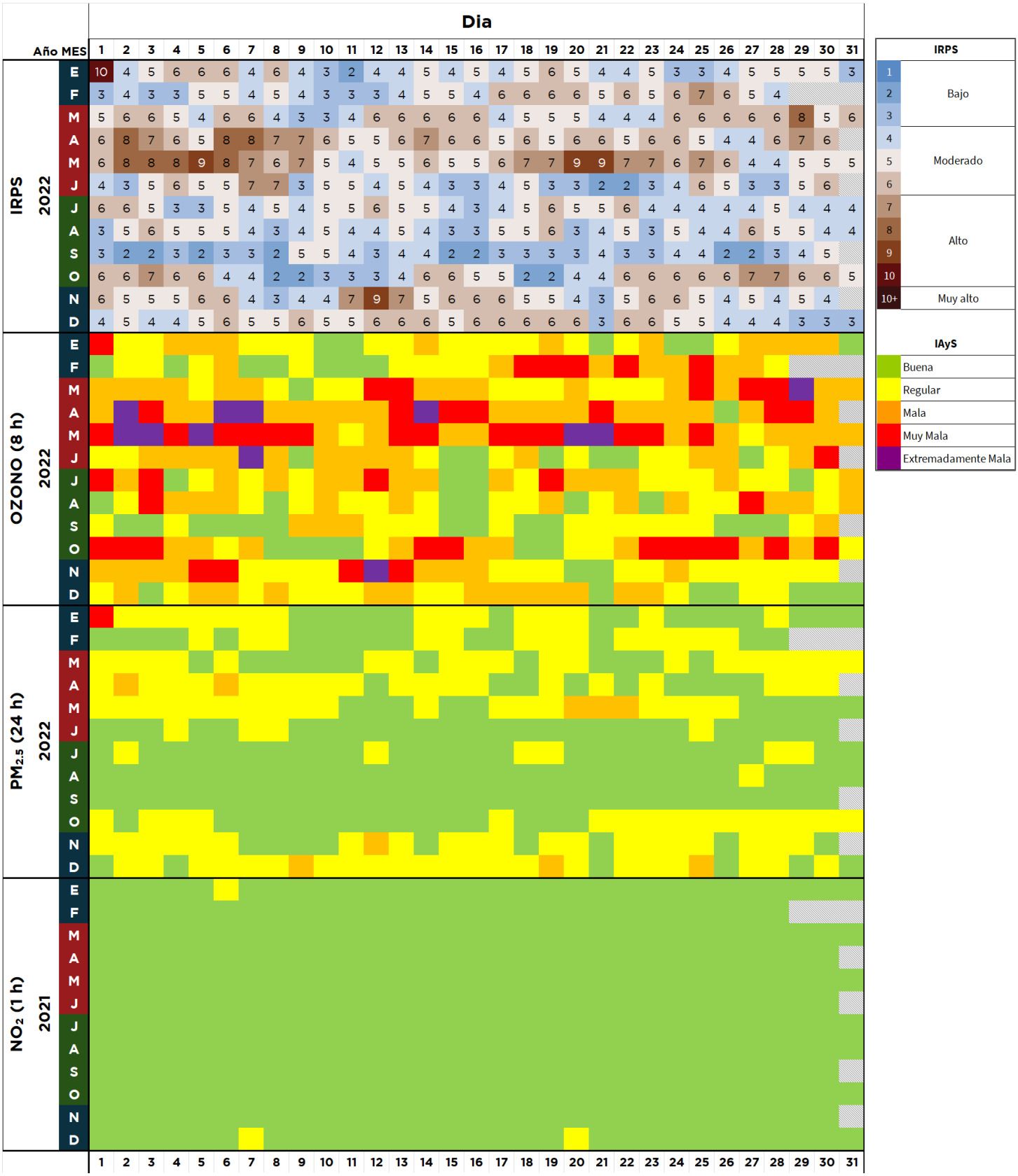


Figura 4.7. Comportamiento del IRPS en 2022 y comparación con el índice AIRE y SALUD de O_3 (8 h), $PM_{2.5}$ (24 h) y NO_2 (1 h)

CAPÍTULO 5

Eventos de alta concentración de ozono y partículas

Eventos de contingencias atmosféricas

Las contingencias ambientales atmosféricas son eventos atípicos y transitorios en los que se alcanzan valores muy altos de concentración de algunos contaminantes y son el resultado de una combinación específica de factores meteorológicos, así como de emisiones. En el caso de ozono, las emisiones de sus precursores se mantienen casi constantes durante el año, por lo que sus eventos de contingencias están fuertemente relacionados con factores meteorológicos como los sistemas de alta presión que causan estabilidad atmosférica. En partículas, sus episodios pueden estar influenciados por vientos intensos e inversiones térmicas; sin embargo, sus emisiones sí cambian durante el año, por ejemplo, la mayoría de las contingencias de partículas en la ZMCM son causadas por el uso de pirotecnia durante las festividades navideñas y de año nuevo, así como los incendios, por ejemplo, los ocurridos durante mayo del 2019 en el centro del país.

Las **contingencias de ozono** tienen características meteorológicas como la estabilidad atmosférica, altas temperaturas, viento débil, intensa radiación solar y cielos despejados que son causados por los sistemas de alta presión; dichas características normalmente se presentan durante los meses de seca caliente (marzo a mayo). En la ZMCM, se considera que desde el 15 de febrero al 15 de junio de cada año se presenta la "**temporada de ozono**", en la cual se ocurren las condiciones meteorológicas mencionadas que históricamente han propiciado el mayor número de contingencias de ozono, especialmente de marzo a mayo, en los que se presentan eventos más prolongados y con los niveles más altos de concentración. Adicionalmente, la ZMCM tiene características geográficas y de terreno que favorecen el estancamiento de contaminantes, como la barrera natural de montañas al sur de la zona metropolitana. Los vientos predominantes en la ZMCM son de norte a sur, lo cual también influye en el transporte y acumulación de contaminantes en el centro y sur de la ciudad (**Figura 5.1**).

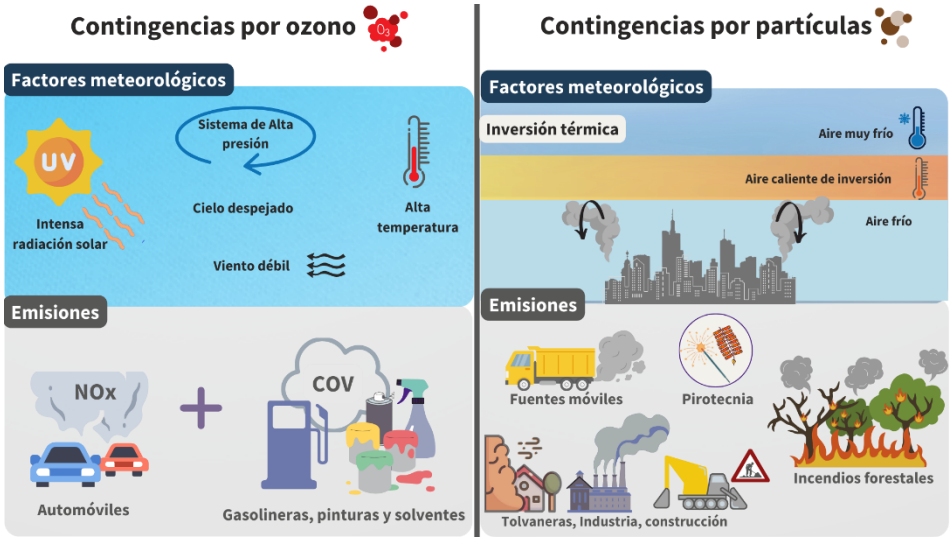


Figura 5.1. Factores que influyen en la activación de las contingencias atmosféricas de la ZMCM.

En la **Tabla 5.1** se presentan los umbrales vigentes para activar el programa de contingencias, el cual determina la activación y suspensión de las Fases de contingencia por tipo de contaminante. La **Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAMe)**, es la entidad responsable de activar o desactivar las contingencias ambientales atmosféricas y considera los datos provenientes de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT), así como la revisión de los pronósticos meteorológicos para el día actual y el siguiente; con la finalidad de estimar si las condiciones serán favorables para la dispersión de contaminantes.

Tabla 5.1. Programa de contingencias ambientales atmosféricas vigente en 2021

A) FASES PREVENTIVAS

CONTAMINANTE	ACTIVACIÓN	SUSPENSIÓN
Ozono	Pronóstico O_3 > 142 ppb Probabilidad de ocurrencia del 70 %.	Al día siguiente (19:00 h) o con la activación de Fase de contingencia.
Partículas	PM_{10} > 172 µg/m^3 o $PM_{2.5}$ > 81.4 µg/m^3 Será **regional** cuando se presente en al menos una estación y en una de las cinco zonas de la ZMCM.	PM_{10} ≤ 172 µg/m^3 o $PM_{2.5}$ ≤ 81.4 µg/m^3 Con pronóstico meteorológico favorable para el día siguiente o con la activación de Fase de contingencia.

B) FASES DE CONTINGENCIA

CONTINGENCIA	CONDICIONES DE ACTIVACIÓN			CONDICIONES DE SUSPENSIÓN		
	O_3	PM_{10}	$PM_{2.5}$	O_3	PM_{10}	$PM_{2.5}$
FASE I (FI)	> 154 ppb	>214 µg/m^3	> 97.4 µg/m^3	Concentración menor a la de la Fase y con pronóstico meteorológico favorable para el día siguiente.		
FASE II (FII)	> 204 ppb	> 354 µg/m^3	> 150.4 µg/m^3			
FASES COMBINADAS	O_3 > 154 ppb **+** PM_{10} > 186 µg/m^3 **o** O_3 > 154 ppb **+** $PM_{2.5}$ > 86.7 µg/m^3 **o** O_3 > 142 ppb **+** PM_{10} > 214 µg/m^3 **o** O_3 > 142 ppb **+** $PM_{2.5}$ > 97.4 µg/m^3			Concentración menor a la de la Fase, depende de la combinación de contaminantes y del pronóstico meteorológico favorable para el día siguiente.		

Notas:

- El indicador para ozono es el máximo del promedio horario y en partículas es el máximo del promedio móvil de 24 h.
- El Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas (PPRECCA) es vigente a partir del 29 de mayo de 2019.

CRONOLOGÍA DE LAS CONTINGENCIAS DURANTE 2022

En 2022 se presentaron seis contingencias por ozono, esta cantidad de eventos es alta en comparación con los 5 años anteriores (2017-2021); sin embargo, el 2016 fue el año con mayor número de contingencias (diez eventos). Es importante mencionar que durante 2022 no ocurrieron contingencias por partículas.

En la cronología de los eventos de FI por ozono (**Figura 5.2**) se observó que la **primera contingencia** se presentó a finales de marzo, con una duración de dos días y concentración máxima de 162 ppb en el suroeste de la ZMCM; el **segundo evento** (2 – 4 de mayo) fue el más prolongado e intenso, con 3 días de duración y máximos de 169 ppb en dos estaciones de monitoreo, además otros 4 sitios registraron valores de FI; la **tercera contingencia** ocurrió del 5 al 6 de mayo y estuvo ligada a la anterior, ya que se activó al siguiente día del segundo evento, esta tercera contingencia presentó un máximo de 168 ppb en el centro de la ciudad. El **cuarto evento** de FI se presentó del 20 al 21 de mayo, el cual se activó con 160 ppb en el suroeste de la ZMCM y se alcanzó 172 ppb, este valor fue el máximo horario de O_3 para todo el 2022; mientras que el **quinto evento** (7 – 8 de junio) fue el último dentro de la temporada de ozono y se activó con un máximo de 156 ppb en el suroeste de la ciudad. Finalmente, se tuvo un episodio atípico (fuera de la temporada de ozono), la **sexta contingencia** ocurrió 12 al 14 de noviembre con un máximo de 155 ppb en el suroeste de la ZMCM; aunque este evento también duró tres días, los niveles registrados fueron considerablemente menores a los que se presentaron en temporada de ozono.

El 23 de octubre del 2022, también se presentaron valores de FI; sin embargo, se registraron vientos intensos e incremento de la nubosidad, esto ocasionó que, la concentración descendiera notablemente después del valor máximo; además el pronóstico meteorológico indicaba condiciones favorables de dispersión, por lo tanto, la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAMe) decidió no activar la FI.

En la **Figura 5.3** se puede observar que los eventos de contingencias se agruparon en la región suroeste y centro de la ZMCM, ya que las estaciones con los valores máximos que originaron la activación de las contingencias fueron Benito Juárez (BJU) en el centro, Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA), Cuajimalpa (CUA) y Santa Fe (SFE) ubicadas en el suroeste. Además, otros sitios de monitoreo ubicados en estas zonas, registraron valores de contingencia (FI > 154 ppb), como Merced (MER), Iztacalco (IZT), Ajusco Medio (AJM), Pedregal (PED) y UAM Iztapalapa (UIZ).

Figura 5.2. Cronología de las contingencias atmosféricas durante 2022.

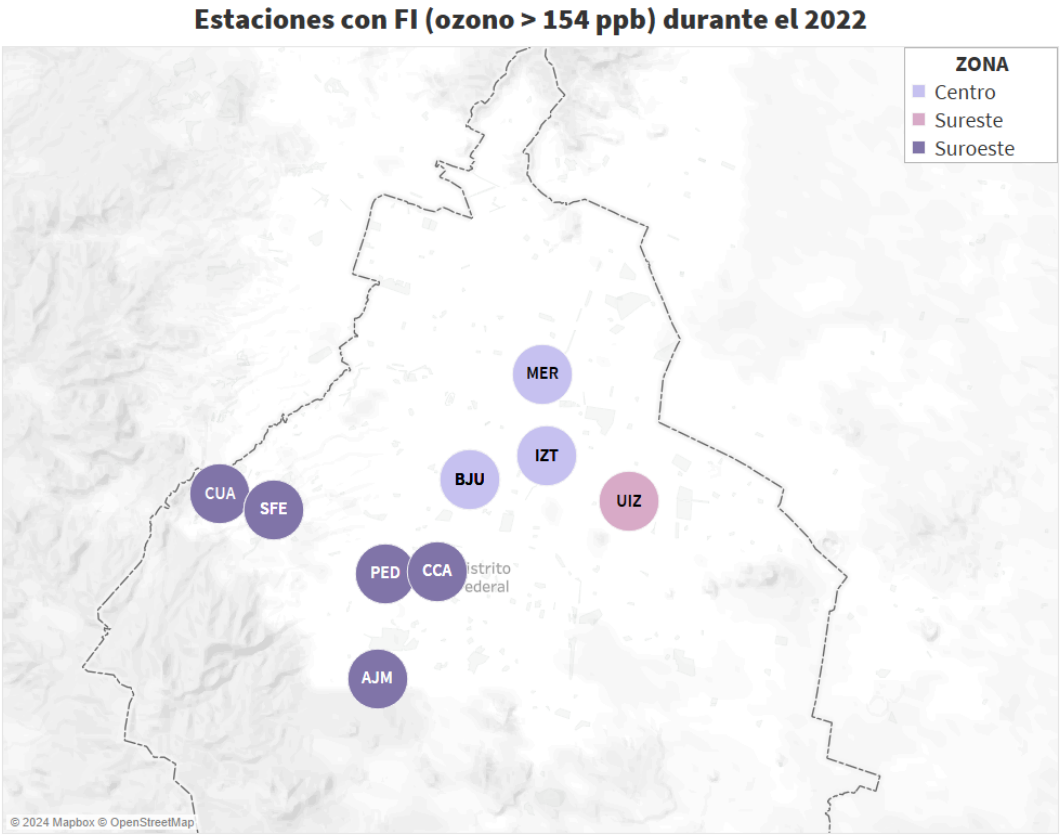


Figura 5.3. Estaciones del **suroeste** (AJM, CCA, CUA, PED, SFE), **centro** (BJU, IZT, MER) y **sureste** (UIZ) que registraron valores mayores a 154 ppb durante las contingencias del 2022.

En las características generales de las contingencias ocurridas durante 2022, se observó que los datos que activaron la FI estuvieron en sitios del suroeste y centro de la ZMCM; sin embargo, los eventos presentaron concentraciones altas en diversos sitios y regiones. En la **Figura 5.4**, se presenta el perfil horario por zona de los eventos de contingencia agrupados por el mes en el que se registraron: marzo, junio y noviembre con un evento cada uno; mientras que mayo tuvo 3 episodios. Las estaciones se agruparon de acuerdo con la región de la ZMCM a la que corresponden: Suroeste (**SO**), Sureste (**SE**), Centro (**CE**), Noreste (**NE**) y Noroeste (**NO**). Para la construcción de cada perfil se consideró el indicador del percentil 95 (P95) de los datos horarios de O_3 con la finalidad de representar mejor las concentraciones más altas en las contingencias. Se puede observar, que los eventos durante los meses de la temporada seca caliente (marzo y mayo) obtuvieron los valores más altos en comparación con el resto de los episodios, además, la zona SO predominó en todas las contingencias, seguida del CE y SE, excepto en el episodio de noviembre, en la que el SO y NO registraron los valores más altos. En los eventos de marzo y mayo, la zona SO presentó valores superiores a 50 ppb desde la madrugada, a diferencia del resto de las regiones, que tuvieron concentraciones más bajas y tienen su mínimo de 06:00 – 07:00 h más pronunciado. En los episodios de junio y noviembre, el comportamiento durante las mañanas fue similar entre zonas; sin embargo, el SO obtuvo los valores más altos. En las tres contingencias en mayo, también se tuvo una mayor duración del pico (P95 > 90 ppb), ya que comienza desde las 11:00 hasta las 19:00 h con un total de 9 horas; seguido de junio (11:00 a 18:00 h, 8 horas), noviembre (12:00 a 18:00 h, 7 horas) y marzo (12:00 a 17:00 h, 6 horas).

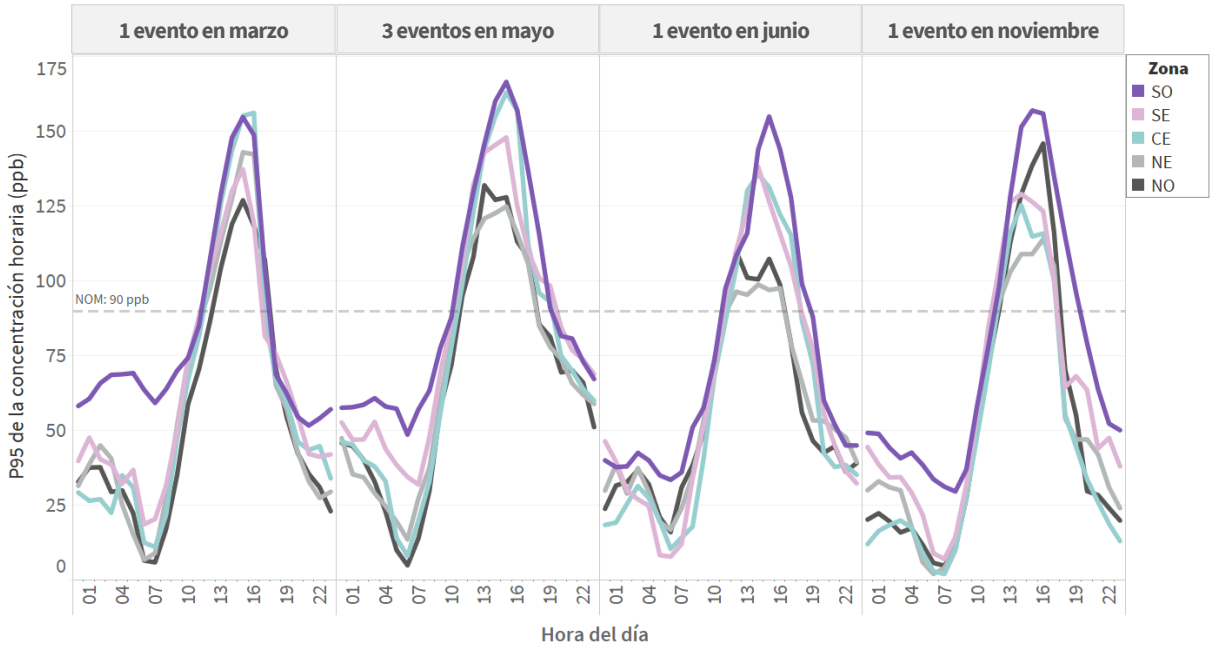


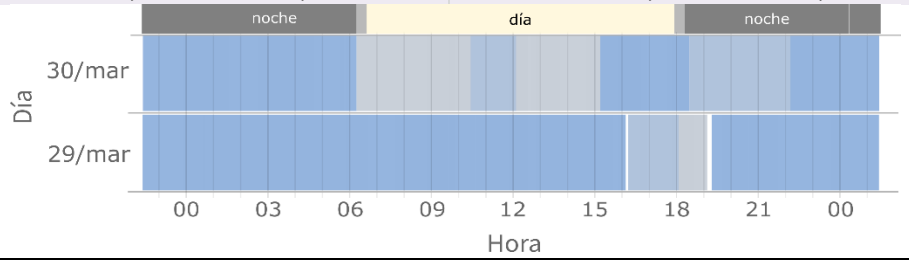
Figura 5.4. Perfil horario de los eventos de contingencia durante los meses de marzo, mayo, junio y noviembre. Cada línea agrupa las estaciones por su zona: SO, SE, CE, NE y NO. No se consideran los sitios de transporte de contaminantes (ACO, AJU, INN, MON y MPA).

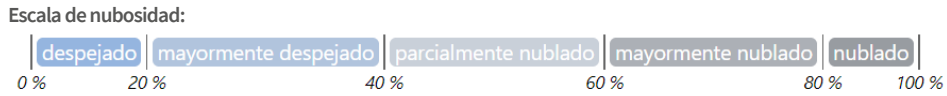
29 DE MARZO 2022: FASE I DE OZONO

El primer episodio de Fase I (FI) tuvo una duración de dos días, la CAMe activó la contingencia el 29 de marzo y la finalizó en la tarde del 30 de marzo. La concentración de O_3 registró niveles de FI en tres sitios de monitoreo durante el 29 de marzo, mientras que, al siguiente día se presentaron valores más bajos y pronóstico meteorológico favorable, por lo tanto, la FI fue suspendida.

En la **Tabla 5.2** se presentan algunas características meteorológicas durante los dos días de la contingencia, se puede observar que el viento fue menos intenso y el cielo estuvo despejado durante el 29 de marzo; mientras que el 30 de marzo, aunque se presentaron temperaturas más altas, el cielo estuvo parcialmente nublado a despejado, además la velocidad de viento fue ligeramente mayor.

Tabla 5.2. Características del episodio de contingencia del 29 al 30 de marzo del 2022.

Variable	Fechas dentro del episodio contingencia	
	29/marzo	30/marzo
Viento	Promedio (09:00 – 13:00 h): **1.7 m/s** Promedio (14:00 – 18:00 h): **2.6 m/s**	Promedio (09:00 – 13:00 h): **2.6 m/s** Promedio (14:00 – 18:00 h): **3.3 m/s**
Temperatura	Máximo (09:00 – 18:00 h): **30 °C** Promedio (09:00 – 18:00 h): **24 °C**	Máximo (09:00 – 18:00 h): **31 °C** Promedio (09:00 – 18:00 h): **26 °C**
Nubosidad		



Durante el 29 de marzo (**Figura 5.5**), la concentración de O_3 superó la NOM (90 ppb) desde las 13:00 h, con 11 estaciones que registraron valores mayores a 90 ppb y un máximo de 109 ppb en la estación Santa Fe (SFE). En las siguientes horas, la concentración aumentó y a las 15:00 h, el máximo fue 152 ppb en Benito Juárez (BJU); en este momento, otros 18 sitios superaron la NOM. El valor más alto del día se alcanzó a las 16:00 h en SFE con 162 ppb, además, la estación Merced (MER) también registró concentración de FI con 156 ppb y otros 19 sitios superaron el umbral normado (**Figura 5.6a**). Debido a estos valores y a las condiciones meteorológicas adversas, la CAMe activó la FI de contingencia a las 16:00 h.

En las horas previas a la FI (10:00 – 16:00 h), se presentó una dirección de viento predominante del norte hacia el suroeste (**Figura 5.6b**), estos vientos trasladaron contaminantes precursores que favorecieron la formación y acumulación de O_3 en dicha región, la cual tiene poca ventilación debido a la barrera montañosa. Los máximos alcanzados durante este día fueron consecuencia de un sistema de alta presión sobre el centro del país que ocasionó estabilidad atmosférica, es decir, viento débil, intensa radiación solar y baja nubosidad; estas condiciones meteorológicas adversas, favorecieron la producción y estancamiento de O_3 en la región centro-suroeste de la ZMCM.

A las 17:00 h, la concentración continuaba en FI con el máximo en BJU (157 ppb) y otras 18 estaciones que superaban el valor normado. En la siguiente hora (18:00 h), el máximo fue 118 ppb en Atizapán (ATI) y 5 sitios más registraron concentraciones mayores a 90 ppb; finalmente, a las 19:00 h, los valores de O_3 en todas las estaciones fueron menores a la NOM con un máximo de 79 ppb en ATI.

En el siguiente día (30 de marzo), la NOM se superó desde las 13:00 h en dos sitios de monitoreo, con una concentración máxima de 93 ppb en Villa de las Flores (VIF). A las 15:00 h, 4 sitios rebasaron la NOM, con un máximo de 108 ppb en Los Laureles (LLA). El valor más alto del día fue a las 16:00 h con 117 ppb en la estación LLA, después de esta hora, la concentración disminuyó gradualmente y a las 18:00 h, todos los sitos registraron valores menores al límite normado; por lo que la CAMe suspendió la contingencia, debido a que ya no se superó el umbral de FI y el pronóstico meteorológico indicaba un debilitamiento del sistema de alta presión, así como mayor intensidad de viento y mejores condiciones para la dispersión de contaminantes (CAMe, 2022a).

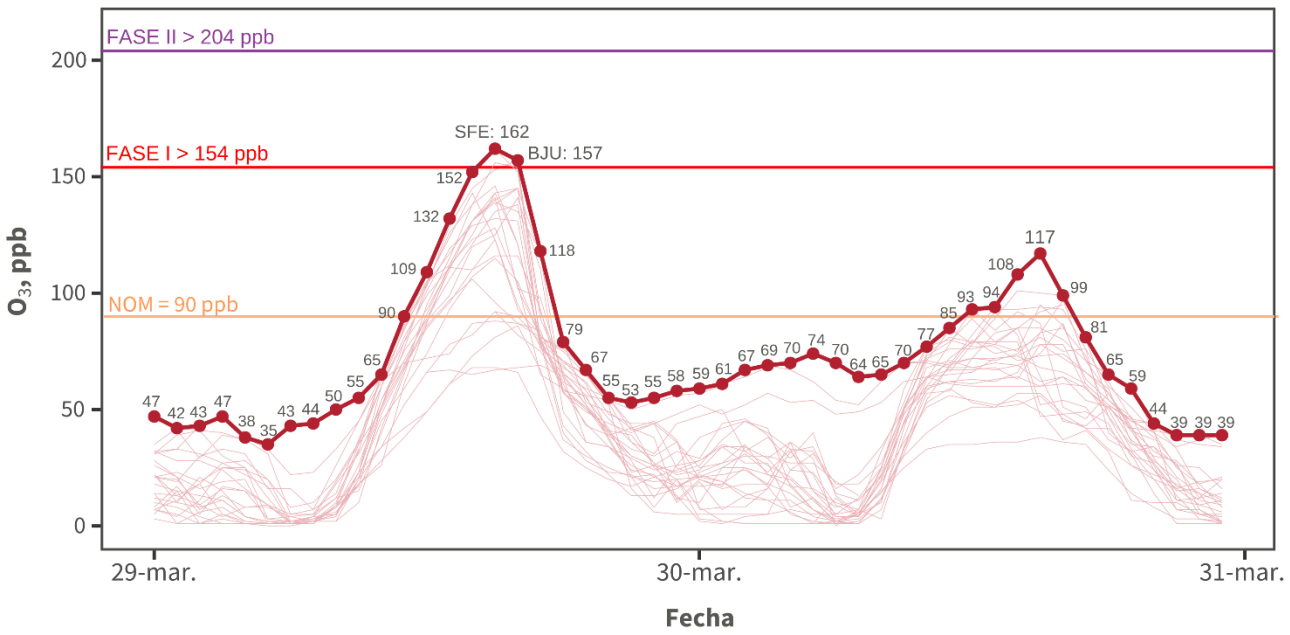


Figura 5.5. Concentración de O_3 del 29 al 30 de marzo. Las líneas delgadas corresponden a la concentración horaria por estación y la línea gruesa resalta el máximo por hora. Las líneas horizontales son los valores para la NOM, Fases I y II del programa de contingencia.

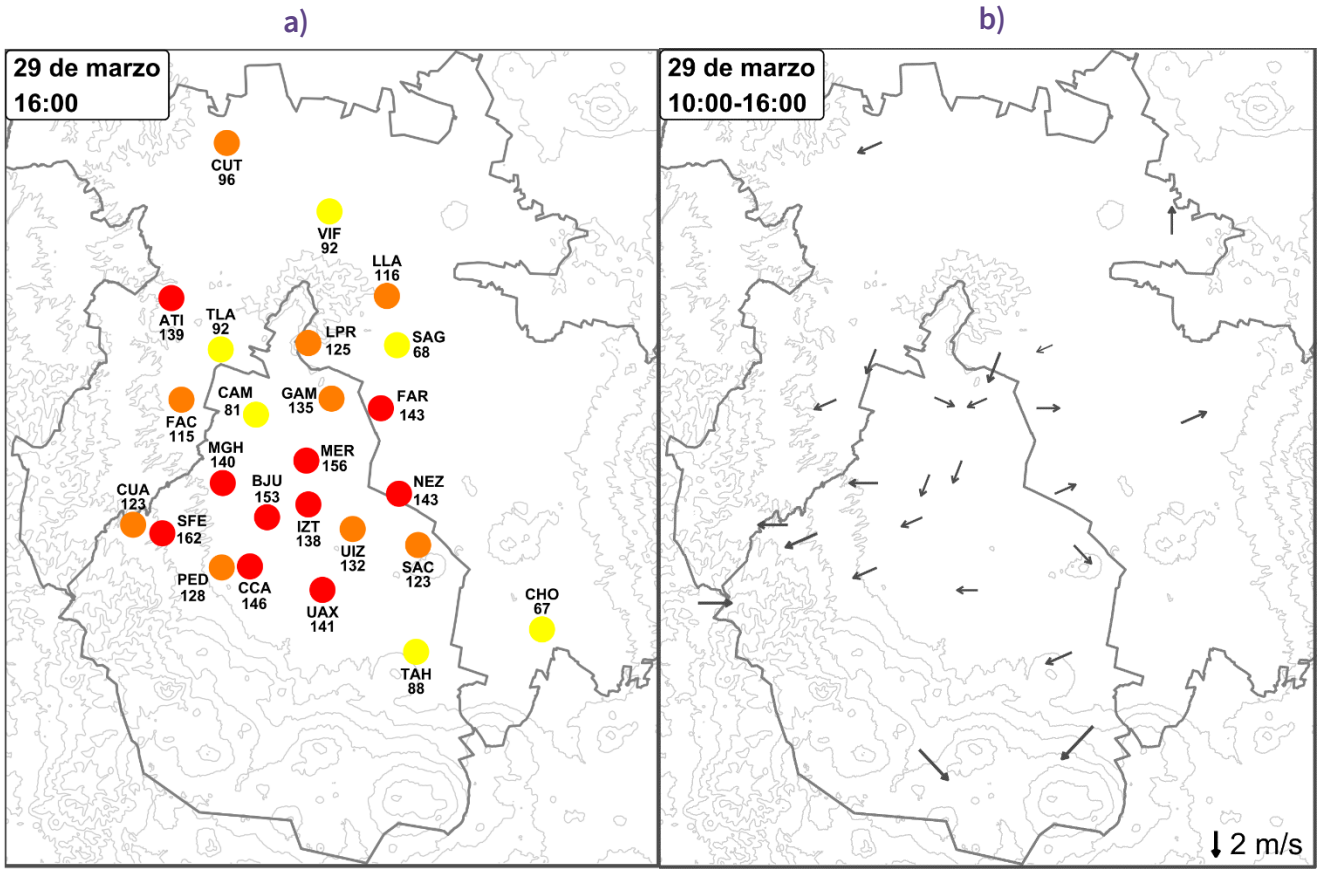


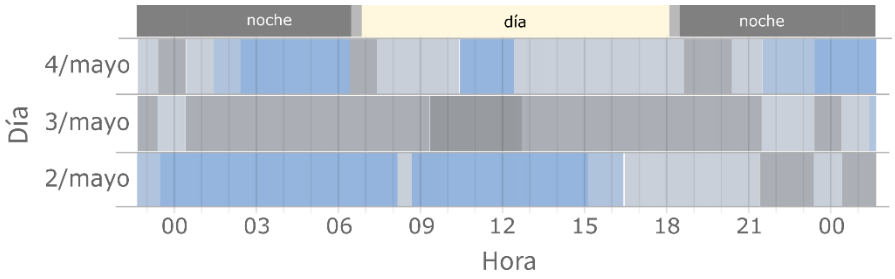
Figura 5.6. a) Máximo de O_3 (ppb) con su categoría (color) del Índice AIRE Y SALUD a las 16:00 h del 29 de marzo. **b)** Vector promedio del viento del 29 de marzo entre las 10:00 y 16:00 h.

02 DE MAYO 2022: FASE I OZONO

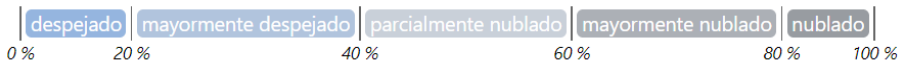
El segundo episodio fue de los más prolongados del 2022, ya que tuvo una duración de tres días. La CAMe activó la contingencia el 2 de mayo y la finalizó en la noche del 4 de mayo. La concentración de O_3 fue alta durante los tres días del episodio; sin embargo, sólo se alcanzaron niveles de FI durante el 2 de mayo, en este día, seis sitios de monitoreo superaron los 155 ppb.

En las características meteorológicas de este evento (**Tabla 5.3**), se puede observar que la velocidad de viento de 09:00 a 13:00 h fue similar en los tres días con el mínimo durante el 3 de mayo (1.4 m/s), mientras que de 14:00 a 18:00 h, que es el periodo en el que se presenta el pico de O_3, la velocidad de viento tuvo un promedio de 2.2 a 2.8 m/s. Las temperaturas también fueron parecidas en todo el periodo y en cuanto a la nubosidad, el primer día se mantuvo con cielo despejado en las horas relevantes para la formación de O_3, el 3 de mayo estuvo mayormente nublado y el 4 de mayo el cielo fue despejado a parcialmente nublado de las 11:00 a 18:00 h.

Tabla 5.3. Características del episodio de contingencia del 2 al 4 de mayo del 2022.

Variable	Fechas dentro del episodio contingencia		
	2/mayo	3/mayo	4/mayo
Viento	Promedio (09:00 – 13:00 h): **1.7 m/s** Promedio (14:00 – 18:00 h): **2.4 m/s**	Promedio (09:00 – 13:00 h): **1.4 m/s** Promedio (14:00 – 18:00 h): **2.2 m/s**	Promedio (09:00 – 13:00 h): **1.8 m/s** Promedio (14:00 – 18:00 h): **2.8 m/s**
Temperatura	Máximo (09:00 – 18:00 h): **30 °C** Promedio (09:00 – 18:00 h): **25 °C**	Máximo (09:00 – 18:00 h): **31 °C** Promedio (09:00 – 18:00 h): **25 °C**	Máximo (09:00 – 18:00 h): **30 °C** Promedio (09:00 – 18:00 h): **25 °C**
Nubosidad			

Escala de nubosidad:



En el comportamiento del ozono durante el 2 de mayo (**Figura 5.7**), la concentración de O_3 superó la NOM desde las 13:00 h, con un máximo de 91 ppb en la estación Santiago Acahualtepec (SAC). En las siguientes horas, la concentración aumentó considerablemente y a las 15:00 h, el máximo fue 131 ppb en Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA); a esta hora, 18 sitios superaron la NOM. A las 16:00 h, un total de 20 estaciones registraron concentraciones superiores a 90 ppb, el valor más alto fue 153 ppb en CCA, seguida de BJU y SFE, ambas con 150 ppb. El máximo del día se alcanzó a las 17:00 h en BJU y CCA, que registraron 169 ppb, además, las estaciones PED, SFE, IZT y UIZ, también presentaron valores de FI con 166, 165, 156 y 155 ppb, respectivamente; en este momento, otros 14 sitios superaron el umbral de la NOM (**Figura 5.8a**). Estos niveles altos de concentración en varias estaciones de monitoreo y la presencia de condiciones meteorológicas adversas, ocasionaron que la CAMe activara la FI de contingencia.

En las horas previas a la FI (11:00 – 17:00 h), se presentó una dirección de viento predominante del noreste hacia el suroeste (**Figura 5.8b**), estos vientos trasladaron contaminantes precursores que favorecieron la formación de O_3, también se presentaron zonas de confluencia de vientos en el centro-norte de la ciudad, lo que ocasionó acumulación del contaminante. Los niveles alcanzados durante este día fueron consecuencia de un sistema de alta presión sobre la ZMCM que ocasionó estabilidad atmosférica, con viento débil, intensa radiación solar y baja nubosidad; estas condiciones meteorológicas adversas, favorecieron el aumento de O_3 en la región centro-suroeste de la ZMCM. A las 18:00 h, la concentración continuaba en FI con el máximo en BJU (165 ppb) y otras 19 estaciones que superaban el valor normado. En la siguiente hora (19:00 h), los niveles descendieron y el máximo fue 116 ppb en el sitio Miguel Hidalgo (MGH), junto con otras 8 estaciones que presentaron valores mayores a 90 ppb; finalmente, para la siguiente hora (20:00 h), los valores de O_3 en todos los sitios fueron menores a la NOM, con un máximo de 85 ppb en VIF.

En el siguiente día (3 de mayo), la NOM se superó desde las 14:00 h en 9 estaciones, con una concentración máxima de 112 ppb en Gustavo A. Madero (GAM). A las 16:00 h, un total de 18 sitios rebasaron el límite normado y se presentó un máximo de 140 ppb en BJU; la concentración se mantuvo en aumento y a las 17:00 h se alcanzaron 152 ppb en CCA. El valor más alto del día fue a las 18:00 h con 154 ppb en la estación SFE, además otros 17 sitios superaron la NOM. A las 19:00 h, la concentración disminuyó ligeramente; sin embargo, un total de 16 estaciones registraron valores mayores a 90 ppb, con el máximo en SFE (127 ppb). Hasta las 21:00 h, todos los sitios presentaron valores menores a la NOM, con el valor más alto en PED (88 ppb). En este día no se alcanzaron valores de FI, pero debido a que la concentración fue alta (SFE, 154 ppb) y el pronóstico meteorológico era poco favorable para la dispersión; la CAMe decidió mantener la contingencia para el 4 de mayo.

Durante el último día de este evento de FI (4 de mayo), la concentración de ozono superó la NOM en 8 estaciones desde las 13:00 h, con el máximo en SAC (105 ppb). En las siguientes horas aumentaron los niveles del contaminante y a las 15:00 h se excedió la NOM en 23 estaciones, de las cuales, el valor más alto se registró en UAM Xochimilco (UAX) con 143 ppb. El máximo del día fue 149 ppb en BJU a las 16:00 h, en este momento otras 22 estaciones superaban 90 ppb. En las siguientes horas, la concentración disminuyó gradualmente y para las 20:00 h, todas las estaciones obtuvieron valores menores a la NOM, con el máximo en UAX (90 ppb).

La CAMe suspendió la FI a las 20:00 h debido a que ya no se alcanzó el umbral de contingencia; sin embargo, advirtió que las condiciones meteorológicas eran variables y todavía se pronosticaban altas temperaturas, intensa radiación solar y cielo despejado-medio nublado para el siguiente día (CAMe, 2022b).

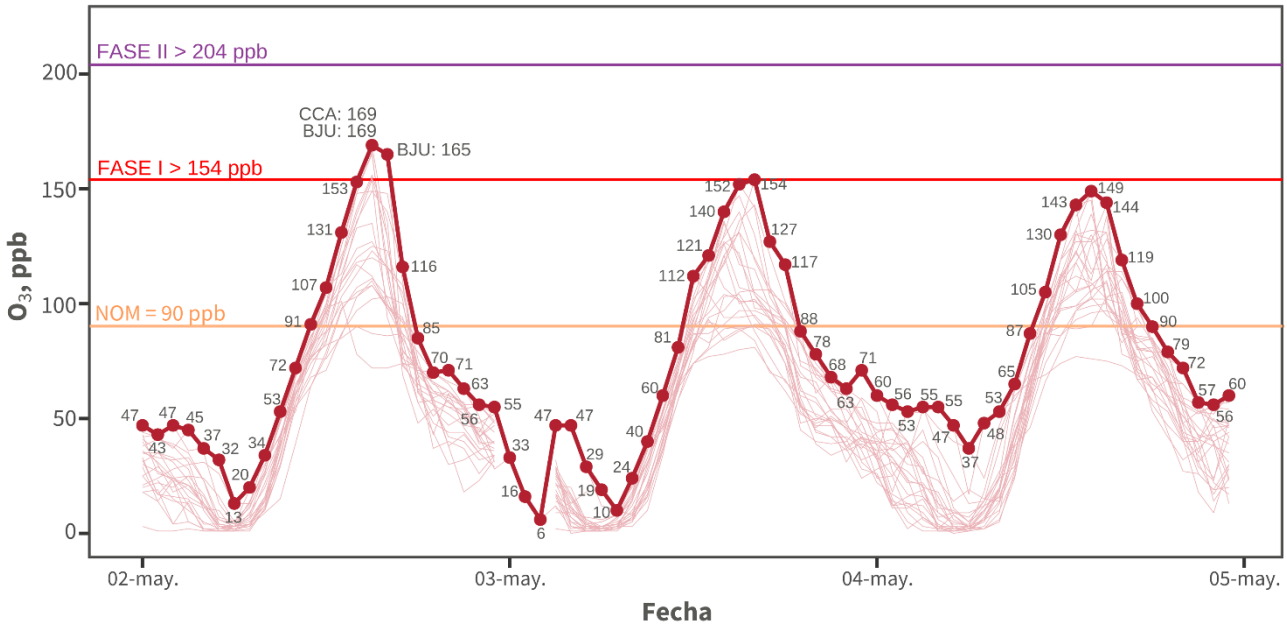


Figura 5.7. Concentración de O_3 del 2 al 4 de mayo. Las líneas delgadas corresponden a la concentración horaria por estación y la línea gruesa resalta el máximo por hora. Las líneas horizontales son los valores para la NOM, Fases I y II del programa de contingencia.

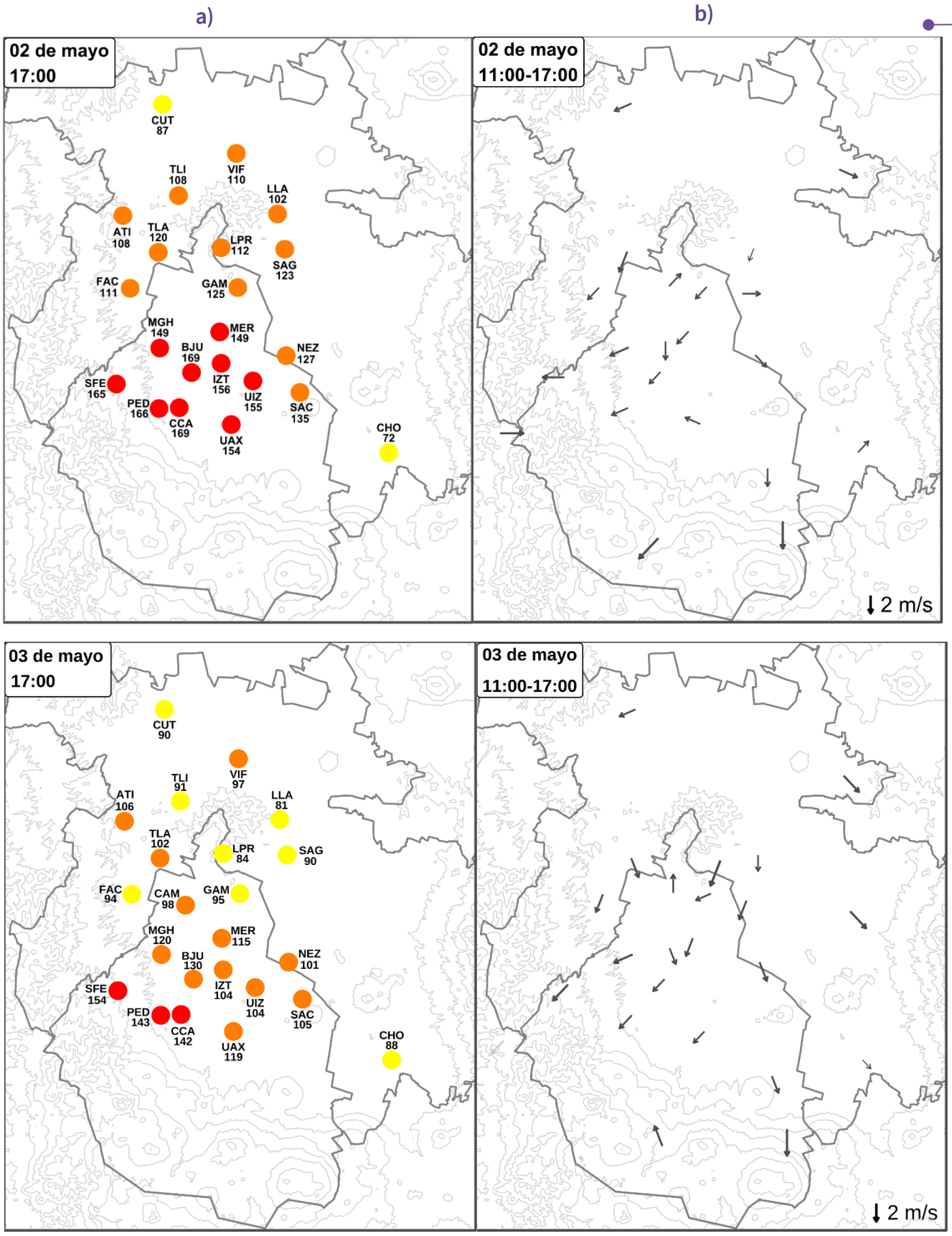


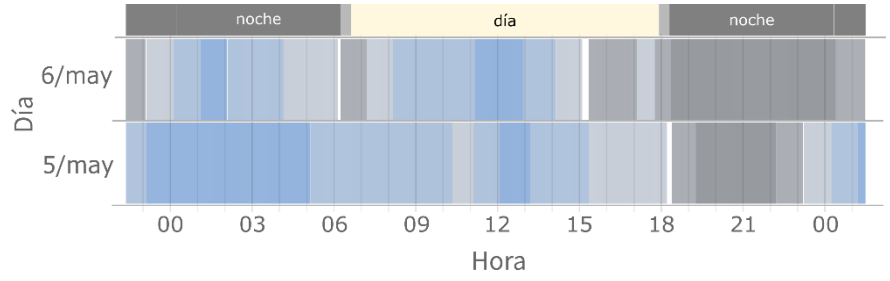
Figura 5.8. a) Máximo de O_3 (ppb) con su categoría (color) del Índice AIRE Y SALUD a las 17:00 h para el 2 de mayo (arriba) y 3 de mayo (abajo). **b)** Vector promedio del viento del 2 de mayo (arriba) y 3 de mayo (abajo) entre las 11:00 y 17:00 h.

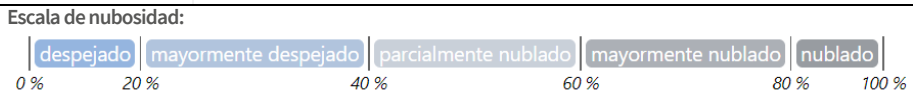
05 DE MAYO 2022: FASE I OZONO

Este tercer episodio tuvo una duración de dos días, la CAMe activó la FI al siguiente día de la suspensión de la contingencia anterior y la finalizó en la tarde del 6 de mayo. La concentración de O_3 registró niveles de FI en dos sitios de monitoreo durante el 5 de mayo, mientras que, al siguiente día se presentaron valores más bajos y mejores condiciones atmosféricas, por lo que la FI fue suspendida.

En la **Tabla 5.4** se presentan las características meteorológicas en esta contingencia, durante el 5 de mayo se observó viento débil en la mayor parte del día, especialmente de 09:00 a 13:00 h, y se alcanzó una temperatura máxima de 32 °C, con cielo despejado a parcialmente nublado durante las horas importantes de formación de ozono; mientras que, para el 6 de mayo, la temperatura fue similar al día anterior pero la velocidad de viento fue mayor y la nubosidad aumentó después del mediodía.

Tabla 5.4. Características del episodio de contingencia del 5 al 6 de mayo del 2022.

Variable	Fechas dentro del episodio contingencia	
	5/mayo	6/mayo
Viento	Promedio (09:00 – 13:00 h): **1.6 m/s** Promedio (14:00 – 18:00 h): **2.4 m/s**	Promedio (09:00 – 13:00 h): **2.0 m/s** Promedio (14:00 – 18:00 h): **2.9 m/s**
Temperatura	Máximo (09:00 – 18:00 h): **32 °C** Promedio (09:00 – 18:00 h): **26 °C**	Máximo (09:00 – 18:00 h): **32 °C** Promedio (09:00 – 18:00 h): **26 °C**
Nubosidad		



Durante el 5 de mayo (**Figura 5.9**), la concentración de O_3 superó la NOM (90 ppb) desde las 13:00 h en 16 estaciones, con el valor más alto en GAM con 109 ppb. En las siguientes horas, la concentración aumentó y a las 15:00 h, el máximo fue 144 ppb en la estación IZT; en este momento, otros 22 sitios superaron la NOM. El valor más alto del día se alcanzó a las 16:00 h en BJU con 168 ppb, además, la estación IZT también registró concentración de FI con 155 ppb y en este momento, 23 sitios más excedieron el umbral de la NOM (**Figura 5.10a**). La CAMe activó la FI

de contingencia a las 16:00 h debido a estos niveles registrados y también se pronosticaban condiciones adversas para la dispersión.

En las horas previas al máximo de ozono (10:00 – 16:00 h), se presentaron zonas de confluencia de vientos en el centro y norte de la ZMCM (**Figura 5.10b**), esto favoreció la formación y acumulación de O_3, principalmente en el centro y, más tarde, en el suroeste de la ciudad. Los niveles de ozono registrados estuvieron influenciados por el mismo sistema de alta presión que tuvo presencia en la contingencia anterior (2 al 4 de mayo), que se reforzó en el transcurso del día y provocó estabilidad atmosférica, con baja intensidad del viento, así como cielos despejados; estas condiciones meteorológicas favorecieron la producción y estancamiento de O_3 en la región centro-suroeste de la ZMCM.

A las 17:00 h, la concentración continuaba en FI con el máximo en BJU (163 ppb) y otras 23 estaciones excedieron el valor normado. En la siguiente hora (18:00 h), un total de 24 estaciones presentaron concentraciones superiores a la NOM y el sitio BJU seguía en FI con 157 ppb. Para las 19:00 h, los valores fueron menores al umbral de FI; sin embargo, todavía se superó el límite de 90 ppb en 19 estaciones, con el dato más alto de 119 ppb en Tlalnepantla (TLA). A las 20:00 h, los niveles descendieron con el máximo en SFE y CUA, ambas con 91 ppb; finalmente, para la siguiente hora (21:00 h), los valores de O_3 de todos los sitios fueron menores a la NOM, con un máximo de 85 ppb en SFE.

Para el 6 de mayo, la NOM se superó desde las 13:00 h en un total de 9 estaciones, con un máximo de 105 ppb en UAX. La concentración continuó en aumento y para la siguiente hora se alcanzó un valor de 138 ppb en UAX. El valor más alto del día fue a las 15:00 h con 141 ppb en la estación CCA y otros 20 sitios excedían los 90 ppb, después de esta hora, la concentración comenzó a disminuir gradualmente; sin embargo, los valores superaron la NOM hasta las 21:00 h, en esta hora todas las estaciones registraron concentraciones menores al límite. La CAMe suspendió la FI de contingencia debido a que durante el 6 de mayo ya no se alcanzó el umbral de contingencia y se registraron precipitaciones ligeras a moderadas en la ciudad, además el pronóstico meteorológico indicaba mejores condiciones para la dispersión de contaminantes en el día siguiente (CAMe, 2022c).

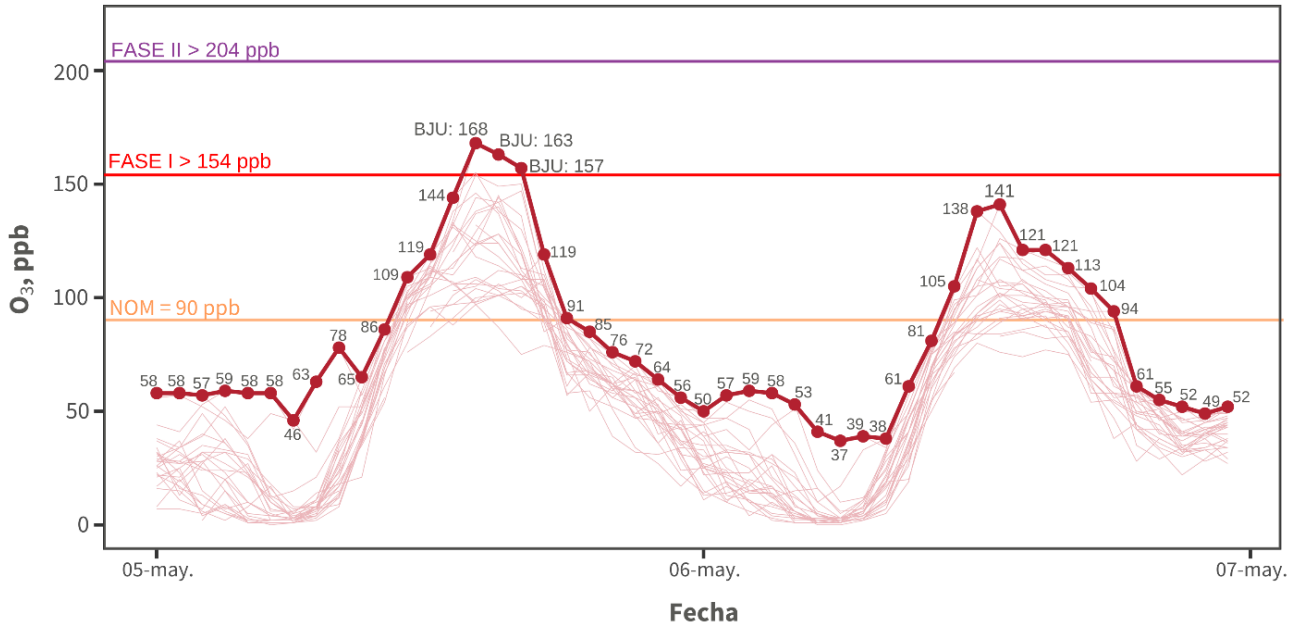


Figura 5.9. Concentración de O_3 del 5 al 6 de mayo. Las líneas delgadas corresponden a la concentración horaria por estación y la línea gruesa resalta el máximo por hora. Las líneas horizontales son los valores para la NOM, Fases I y II del programa de contingencia.

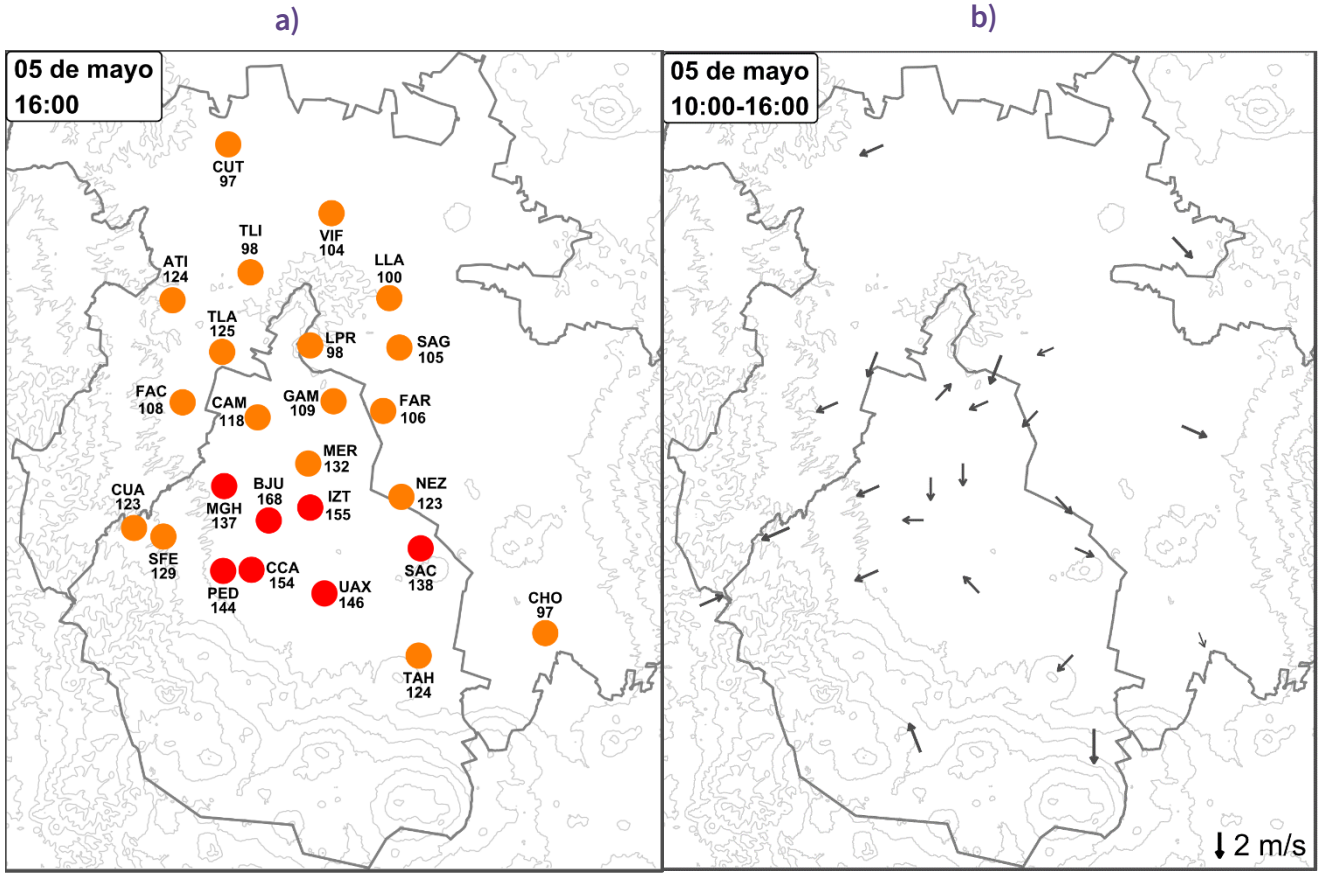


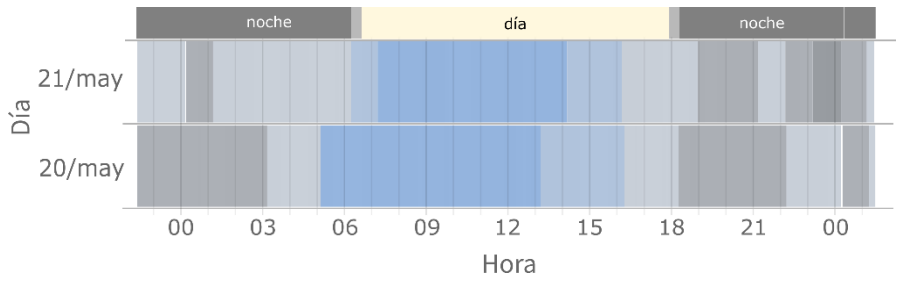
Figura 5.10. a) Máximo de O_3 (ppb) con su categoría (color) del Índice AIRE Y SALUD a las 16:00 h del 5 de mayo. **b)** Vector promedio del viento del 5 de mayo entre las 10:00 y 16:00 h.

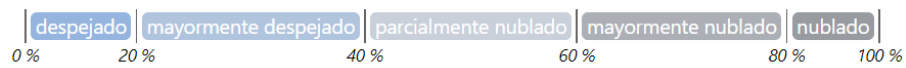
20 DE MAYO 2022: FASE I OZONO

Este fue el cuarto episodio de FI y tuvo una duración de dos días, la CAMe activó la contingencia el 20 de mayo y la finalizó en la tarde del 21 de mayo. La concentración de O_3 registró niveles de FI en seis estaciones diferentes durante el 20 de mayo y este día presentó la concentración horaria más alta del 2022; mientras que para el siguiente día (21 de mayo) los valores fueron menores al umbral de FI por lo que la CAMe suspendió la contingencia.

En cuanto a las características meteorológicas (**Tabla 5.5**), ambos días tuvieron condiciones meteorológicamente similares, con vientos débiles de 09:00 a 13:00 h y un leve incremento en las horas de la tarde (14:00 a 18:00 h); para la temperatura, el segundo día registró valores ligeramente más altos y en la nubosidad, ambos días presentaron cielos despejados desde la mañana hasta las 16:00 h y nublado a partir de las 18:00 h.

Tabla 5.5. Características del episodio de contingencia del 20 al 21 de mayo del 2022.

Variable	Fechas dentro del episodio contingencia	
	20/mayo	**21/mayo**
Viento	Promedio (09:00 – 13:00 h): **2.0 m/s** Promedio (14:00 – 18:00 h): **2.5 m/s**	Promedio (09:00 – 13:00 h): **1.9 m/s** Promedio (14:00 – 18:00 h): **2.5 m/s**
Temperatura	Máximo (09:00 – 18:00 h): **31 °C** Promedio (09:00 – 18:00 h): **25 °C**	Máximo (09:00 – 18:00 h): **32 °C** Promedio (09:00 – 18:00 h): **27 °C**
Nubosidad		



El 20 de mayo (**Figura 5.11**) se superó la NOM (90 ppb) desde las 12:00 h en la estación CCA con 91 ppb. En las siguientes horas, la concentración aumentó considerablemente y a las 14:00 h, el máximo fue 136 ppb en SFE; a esta hora, otros 23 sitios excedieron el límite normado. El valor de FI se alcanzó a las 15:00 h en CUA con 162 ppb, además, la estación SFE también registró concentración de contingencia con 157 ppb y en este momento, otros 20 sitios excedían el umbral de la NOM (**Figura 5.12a**). Debido a estos valores y a las condiciones meteorológicas adversas, la CAMe activó la FI de contingencia.

En las horas previas a la FI (09:00 – 15:00 h), se presentaron zonas de confluencia de vientos en el norte, centro y suroeste de la ZMCM (**Figura 5.12b**), lo que favoreció la formación y acumulación del O_3 en dichas regiones. Las condiciones meteorológicas de este día estuvieron influenciadas por un sistema de alta presión sobre la ZMCM, el cual ocasionó estabilidad atmosférica con viento débil, alta radiación solar y cielo despejado.

Los valores más altos del día se alcanzaron a las 16:00 h, cuatro estaciones registraron valores de FI con el máximo en SFE (172 ppb), seguida de CUA con 170 ppb, PED con 156 ppb y BJU con 155 ppb, además, 17 sitios superaban el límite normado. En la siguiente hora (17:00 h), los niveles se mantuvieron altos con 5 estaciones en FI: SFE (168 ppb), CUA y CCA (162 ppb), PED (159 ppb), AJM (157 ppb) y BJU (155 ppb); mientras que 16 sitios más, excedieron la NOM. A las 18:00 h, la concentración continuaba en FI con el máximo en SFE y CCA, ambas con 162 ppb, seguidas de CUA y PED que registraron 155 ppb cada una; en este momento, otros 15 sitios superaron el límite normado. La concentración presentó valores menores al umbral de FI hasta las 19:00 h; sin embargo, 17 estaciones excedían la NOM con el máximo en AJM (140 ppb). En las siguientes horas, los niveles de ozono continuaron en descenso y hasta las 23:00 h, todos los sitios tuvieron concentraciones menores al límite normado de 90 ppb. En este evento se alcanzaron los valores máximos de O_3 de todo el 2022 (SFE: 172 ppb), además que tuvo una mayor duración ya que los niveles altos de concentración se mantuvieron en FI por 3 horas consecutivas en un total de 6 estaciones diferentes.

En el siguiente día (21 de mayo), la NOM se superó desde las 13:00 h en 14 estaciones, de las cuales SAC presentó la concentración máxima de 107 ppb. A las 14:00 h, 21 sitios rebasaron el límite normado, con un máximo de 134 ppb en UIZ. El valor más alto del día fue a las 15:00 h en UIZ (144 ppb), seguida de MER (142 ppb); en las siguientes horas la concentración disminuyó gradualmente; a las 17:00 h se presentó un máximo de 141 ppb en BJU y otras 21 estaciones superaban la NOM. A las 18:00 h, la concentración todavía era superior a 90 ppb en 19 sitios, de las cuales, CCA presentó el valor más alto (141 ppb) y para la siguiente hora (19:00 h), el máximo fue 117 ppb en SAC, además 13 estaciones excedían la norma. La concentración continuó descenso y hasta las 22:00 h todas las estaciones presentaron datos menores a la NOM, con el máximo en AJM (90 ppb).

La CAMe suspendió la contingencia a las 18:00 h, debido a que en el transcurso del 21 de mayo no se superó el umbral de FI, además los modelos de pronóstico meteorológico indicaban el desplazamiento del sistema de alta presión, lo cual disminuyó la estabilidad atmosférica sobre el Valle de México y se esperaba un aumento de la humedad, así como de la intensidad del viento, en consecuencia, habría mejores condiciones para la dispersión de contaminantes (CAMe, 2022d).

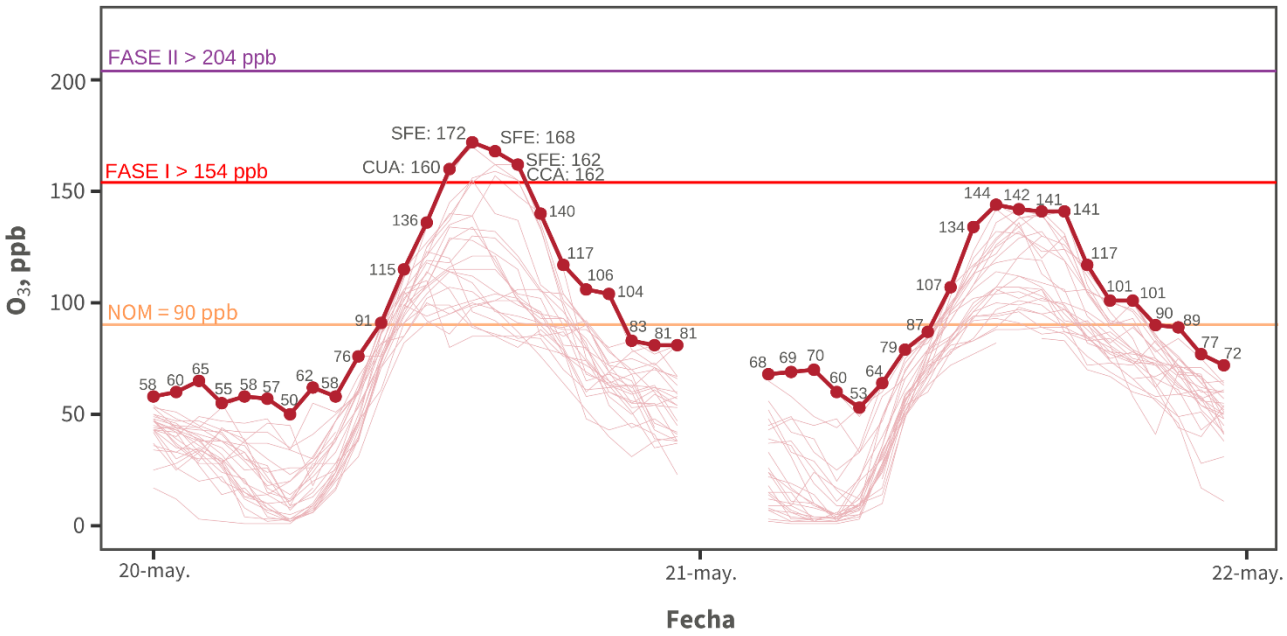


Figura 5.11. Concentración de O_3 del 20 al 21 de mayo. Las líneas delgadas corresponden a la concentración horaria por estación y la línea gruesa resalta el máximo por hora. Las líneas horizontales son los valores para la NOM, Fases I y II del programa de contingencia.

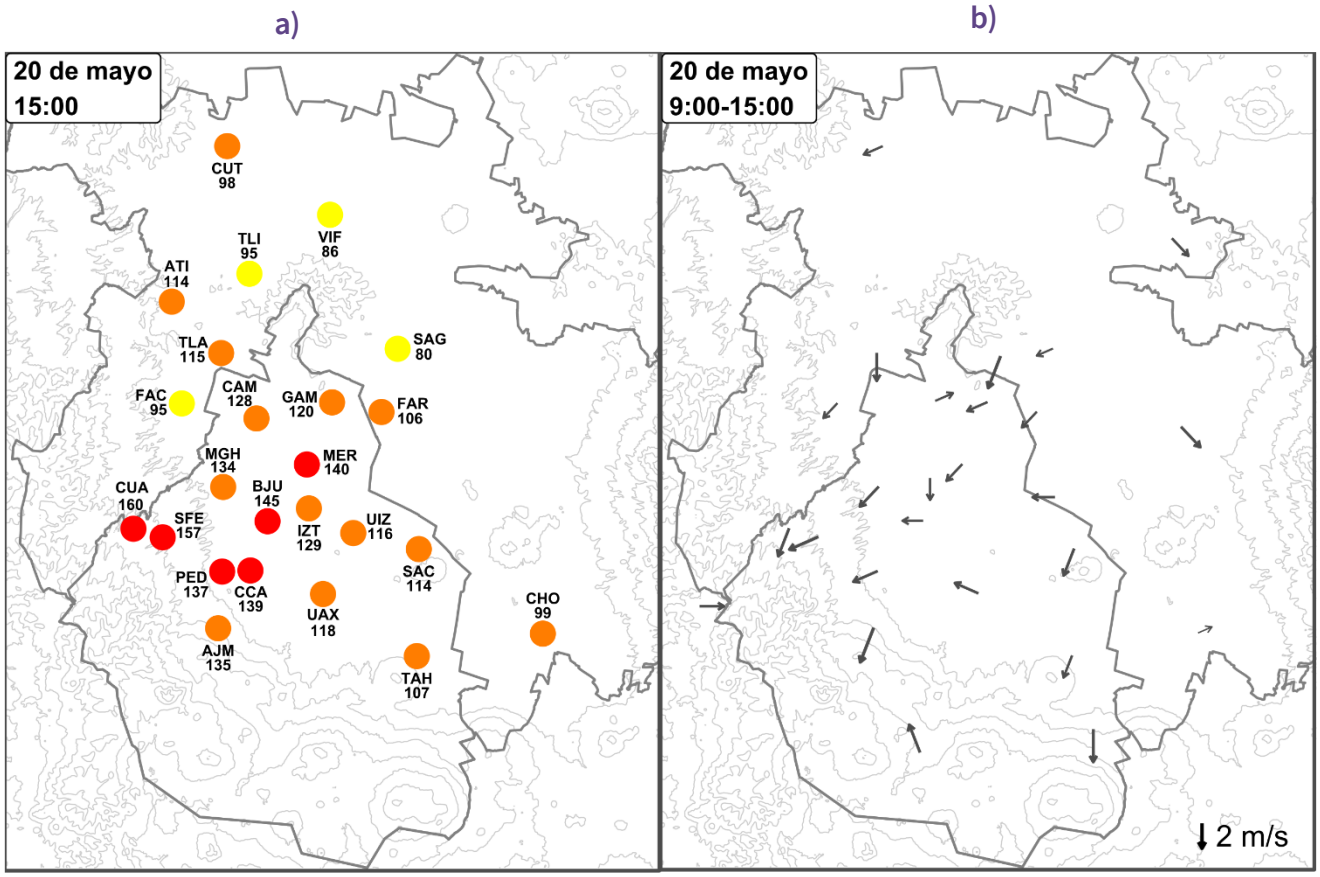


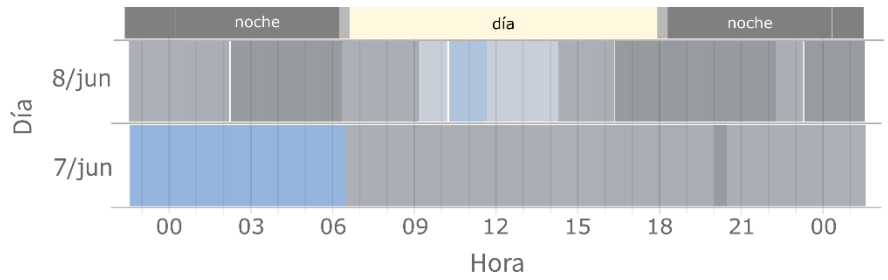
Figura 5.12. a) Máximo de O_3 (ppb) con su categoría (color) del Índice AIRE Y SALUD a las 15:00 h del 20 de mayo. **b)** Vector promedio del viento del 20 de mayo entre las 09:00 y 15:00 h.

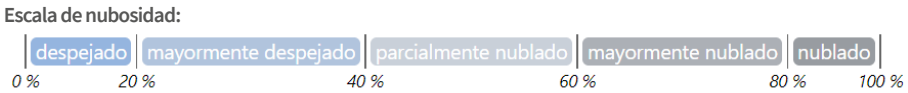
07 DE JUNIO 2022: FASE I OZONO

El penúltimo episodio de FI del año (último dentro de la temporada de ozono), se presentó el 7 de junio y tuvo una duración de dos días. La CAMe activó la contingencia el 7 de junio y la finalizó en la tarde del 8 de junio. La concentración de O_3 alcanzó niveles de FI en un sitio de monitoreo durante el 7 de junio, mientras que, al siguiente día se presentaron niveles más bajos, por lo que la contingencia fue suspendida.

En la **Tabla 5.6** se presentan las características meteorológicas de este episodio, se puede observar que la velocidad del viento fue similar en ambos días, con viento débil de 09:00 a 13:00 h que incrementó en la tarde, de 14:00 a 18:00 h. La temperatura fue mayor durante el 7 de junio, en el que se alcanzó un máximo de 30 °C, mientras que la nubosidad fue mayor durante el 8 de junio.

Tabla 5.6. Características del episodio de contingencia del 7 al 8 de junio del 2022.

Variable	Fechas dentro del episodio contingencia	
	7/junio	8/junio
Viento	Promedio (09:00 – 13:00 h): **1.9 m/s** Promedio (14:00 – 18:00 h): **2.7 m/s**	Promedio (09:00 – 13:00 h): **1.8 m/s** Promedio (14:00 – 18:00 h): **2.9 m/s**
Temperatura	Máximo (09:00 – 18:00 h): **30 °C** Promedio (09:00 – 18:00 h): **24 °C**	Máximo (09:00 – 18:00 h): **27 °C** Promedio (09:00 – 18:00 h): **23 °C**
Nubosidad		



En el comportamiento de la concentración de ozono del 7 de junio (**Figura 5.13**), se observó que se superó la NOM (90 ppb) desde las 14:00 h en un total de 12 estaciones y el máximo fue 108 ppb en Chalco (CHO). En la siguiente hora (15:00 h), la concentración aumentó y el valor más alto fue 131 ppb en IZT; a esta hora, 16 estaciones superaron la NOM. El umbral de FI se rebasó a las 17:00 h en SFE con 156 ppb y en este momento, otros 19 sitios superaron el límite de la NOM (**Figura 5.14a**).

La CAMe activó la FI de contingencia a las 17:00 h debido a los valores registrados y, además, se pronosticaban condiciones meteorológicas adversas. En las horas previas a la activación de la contingencia (11:00 – 17:00 h), se presentó una dirección de viento predominante del norte hacia el sur y suroeste (**Figura 5.14b**), estos vientos trasladaron contaminantes precursores que favorecieron la formación y estancamiento de O_3 en la región sur. Los valores alcanzados durante este día fueron ocasionados por la influencia de un sistema de alta presión cercano a la ZMCM, el cual provocó estabilidad atmosférica, con baja intensidad de viento, alta radiación solar y temperatura.

A las 18:00 h, un total de 18 estaciones superaban el umbral normado, con el máximo en PED (148 ppb), después de esta hora, la concentración se redujo gradualmente y a las 19:00 h el máximo fue 130 ppb en AJM, además 11 sitios excedían los 90 ppb de la NOM. En la siguiente hora (20:00 h), los niveles descendieron considerablemente y tres estaciones superaron el límite normado con el máximo en AJM (101 ppb). Finalmente, para las 22:00 h, los valores de O_3 en todos los sitios fueron menores a la NOM, con un máximo de 61 ppb en SFE.

Para el 8 de junio, la NOM se superó desde las 13:00 h en 6 estaciones, con una concentración máxima de 101 ppb en AJM. El valor más alto del día fue a las 15:00 h con 115 ppb en AJM y otros 12 sitios presentaron concentración mayor a 90 ppb; después de esta hora, los niveles disminuyeron y a las 18:00 h, todas las estaciones registraron valores menores a la NOM con un máximo de 89 ppb en SFE.

La CAMe suspendió la contingencia desde las 15:00 h, debido a que ya no se superó el umbral de FI y el pronóstico meteorológico indicaba un debilitamiento del sistema de alta presión, así como mayor intensidad de viento e incremento de la nubosidad con probabilidad de lluvias moderadas (CAMe, 2022e), en consecuencia, se pronosticaban mejores condiciones para la dispersión de contaminantes.

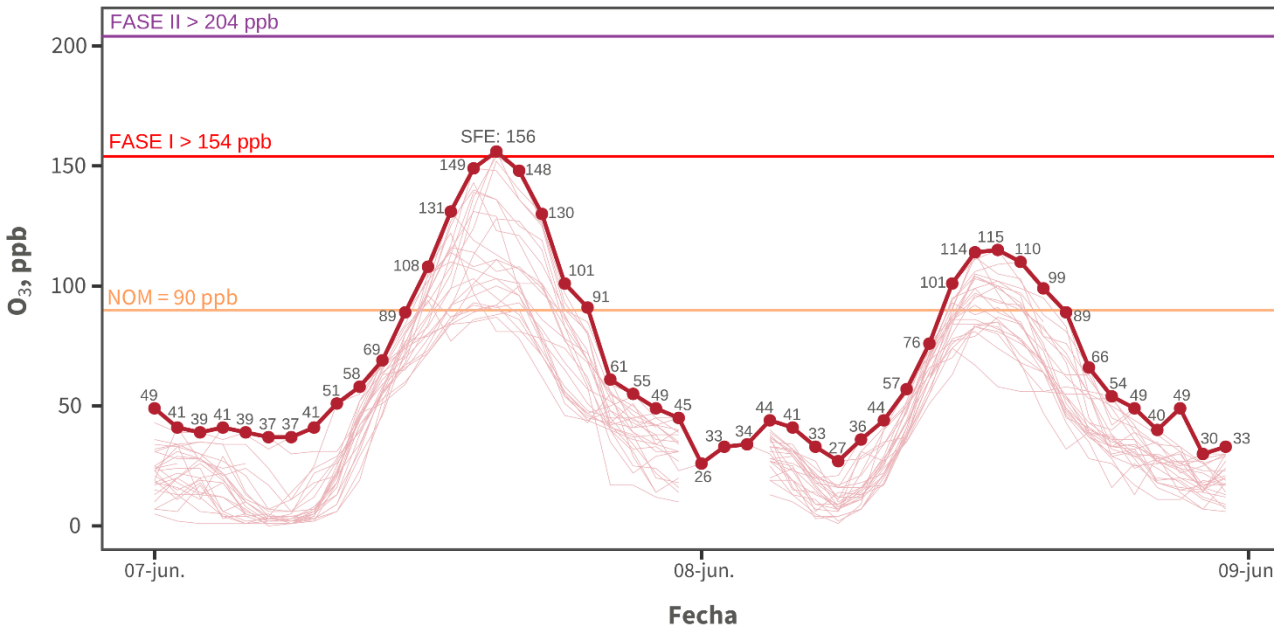


Figura 5.13. Concentración de O_3 del 7 al 8 de junio. Las líneas delgadas corresponden a la concentración horaria por estación y la línea gruesa resalta el máximo por hora. Las líneas horizontales son los valores para la NOM, Fases I y II del programa de contingencia.

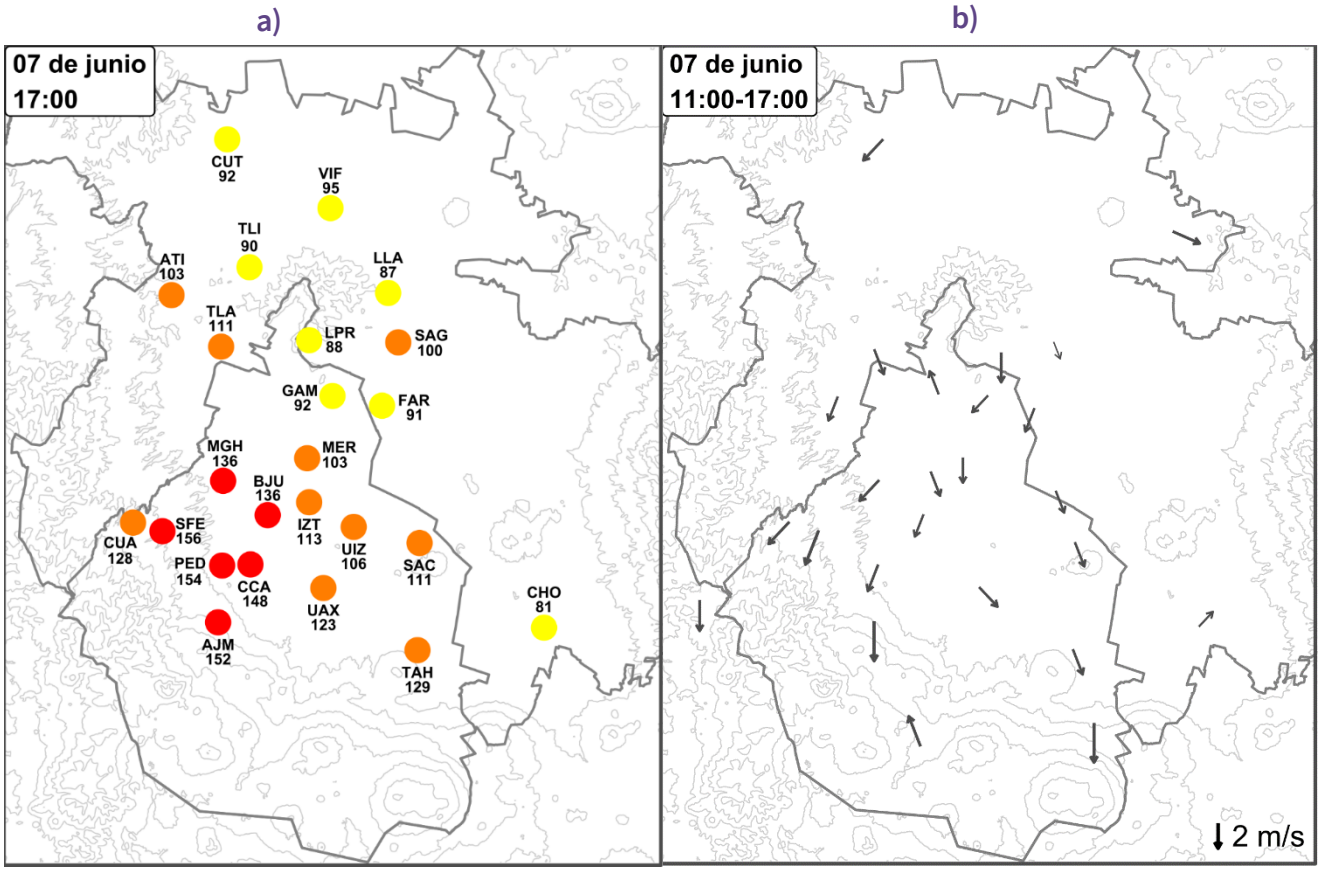


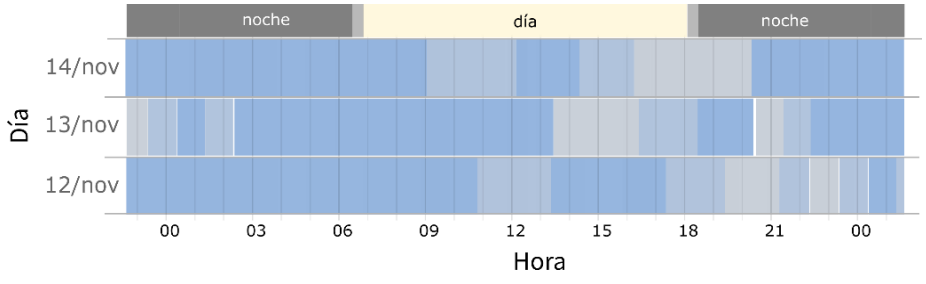
Figura 5.14. a) Máximo de O_3 (ppb) con su categoría (color) del Índice AIRE Y SALUD a las 17:00 h del 7 de junio. **b)** Vector promedio del viento del 7 de junio entre las 11:00 y 17:00 h.

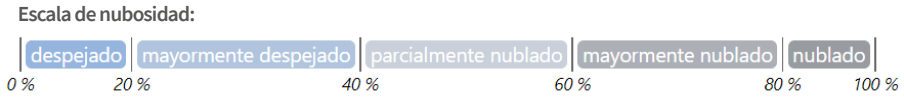
12 DE NOVIEMBRE 2022: FASE I OZONO

Este sexto y último episodio de contingencia del 2022 se consideró atípico ya que ocurrió fuera de la temporada de ozono, tuvo una duración total de tres días. La CAMe activó la contingencia el 12 de noviembre y la finalizó en la tarde del 14 de noviembre. La concentración de O_3 solamente alcanzó valores de FI durante el primer día (12 de noviembre), en el cual, se mantuvieron concentraciones mayores a 155 ppb por tres horas consecutivasy en dos estaciones diferentes.

En las condiciones meteorológicas de este episodio (**Tabla 5.7**), se observó intensidad de viento similar en el horario de 09:00 a 13:00 h para los tres días; mientras que, en el promedio de las 14:00 a 18:00 h, el primer día (12 de noviembre) obtuvo la velocidad de viento mínima. La temperatura fue similar en los tres días y el cielo estuvo más despejado durante el 12 de noviembre, ya que la nubosidad fue menor al 40 % desde la madrugada hasta las 19:00 h, a diferencia del resto de los días, en los que la nubosidad incrementó desde las 13:00 y 16:00 h para el 13 y 14 de noviembre, respectivamente.

Tabla 5.7. Características del episodio de contingencia del 12 al 14 de noviembre del 2022.

Variable	Fechas dentro del episodio contingencia		
	12/noviembre	**13/noviembre**	**14/noviembre**
Viento	Promedio (09:00 – 13:00 h): **1.9 m/s** Promedio (14:00 – 18:00 h): **1.6 m/s**	Promedio (09:00 – 13:00 h): **1.4 m/s** Promedio (14:00 – 18:00 h): **2.0 m/s**	Promedio (09:00 – 13:00 h): **1.4 m/s** Promedio (14:00 – 18:00 h): **2.5 m/s**
Temperatura	Máximo (09:00 – 18:00 h): **27 °C** Promedio (09:00 – 18:00 h): **20 °C**	Máximo (09:00 – 18:00 h): **27 °C** Promedio (09:00 – 18:00 h): **20 °C**	Máximo (09:00 – 18:00 h): **28 °C** Promedio (09:00 – 18:00 h): **21 °C**
Nubosidad			



En la tarde del 12 de noviembre (**Figura 5.15**), la concentración de O_3 superó la NOM en 10 estaciones a las 12:00 h, con un máximo de 109 ppb en UAX. Para las 14:00 h, la concentración aumentó considerablemente y se presentó un máximo de 134 ppb en UAX; a esta hora, otros 15 sitios superaron la NOM.

El umbral de contingencia se alcanzó a las 15:00 h en CCA con 155 ppb, además, 19 estaciones registraron concentraciones mayores a 90 ppb (**Figura 5.16a**). A las 16:00 h, dos estaciones registraron valores de FI, AJM y CCA, ambas con 157 ppb; para este momento, otros 18 sitios superaron la NOM. Estos niveles de concentración y la presencia de condiciones meteorológicas adversas, ocasionaron que la CAMe activara la contingencia. En las horas previas a la FI (09:00 – 15:00 h), se presentó una dirección de viento predominante del norte hacia el suroeste y se formaron zonas de confluencia en el centro-sur (**Figura 5.16b**), este comportamiento del viento favoreció el transporte de precursores, así como la generación de ozono en el centro y sur donde se acumuló el contaminante. Los máximos alcanzados en la ZMCM fueron consecuencia de la intensa radiación solar, viento débil y poca nubosidad. El valor más alto del día se alcanzó a las 17:00 h en AJM con 163 ppb y en este momento, otros 19 sitios excedían el límite de la norma. A las 18:00 h, la concentración ya fue menor al umbral de la FI; sin embargo, todavía se superaba la NOM en 14 estaciones, con el valor más alto en CCA (139 ppb). Para las 20:00 h, solamente AJM rebasó el límite normado con 122 ppb y finalmente, hasta las 21:00 h los valores de O_3 en todos los sitios fueron menores a la NOM, con un máximo de 89 ppb en AJM.

En el 13 de noviembre, el comportamiento fue similar al día anterior, ya que la NOM se superó desde las 13:00 h en 5 estaciones, con una concentración máxima de 98 ppb en UAX. A las 15:00 h, un total de 17 sitios rebasaron el límite normado, con el máximo en MGH (128 ppb). El valor más alto del día fue a las 17:00 h en la estación MGH que registró 134 ppb, además otros 15 sitios excedieron la NOM. Después de esta hora, la concentración disminuyó y a las 19:00 h, todos los datos fueron menores a la NOM con el máximo de 70 ppb en AJM. De acuerdo con los comunicados de la CAMe, se decidió mantener la contingencia debido a que los modelos de pronóstico meteorológico indicaban que el sistema de alta presión continuaría su influencia sobre la ZMCM, por lo que se estimaban condiciones adversas para la dispersión, como estabilidad atmosférica, alta temperatura y radiación solar, así como viento débil (CAMe, 2022f).

Para el último día de la contingencia, la concentración de O_3 superó la NOM desde las 14:00 h en 7 sitios con el máximo en VIF (99 ppb). En las siguientes horas, se presentó un ligero incremento en los niveles de ozono y a las 16:00 h, 6 estaciones excedieron la NOM con el máximo de 110 ppb en Cuautitlán (CUT). El valor más alto del día se alcanzó a las 17:00 h en VIF con 120 ppb y en este momento, 4 sitios rebasaron el límite NOM. Después de esta hora, la concentración disminuyó considerablemente y a las 18:00 h, todos los datos fueron menores a la norma. La CAMe suspendió la contingencia debido a que las condiciones meteorológicas mejoraron y ya no se alcanzó el umbral de FI, además el pronóstico indicaba el debilitamiento del sistema de alta presión, así como un incremento en la intensidad de viento y en la humedad (CAMe, 2022g).

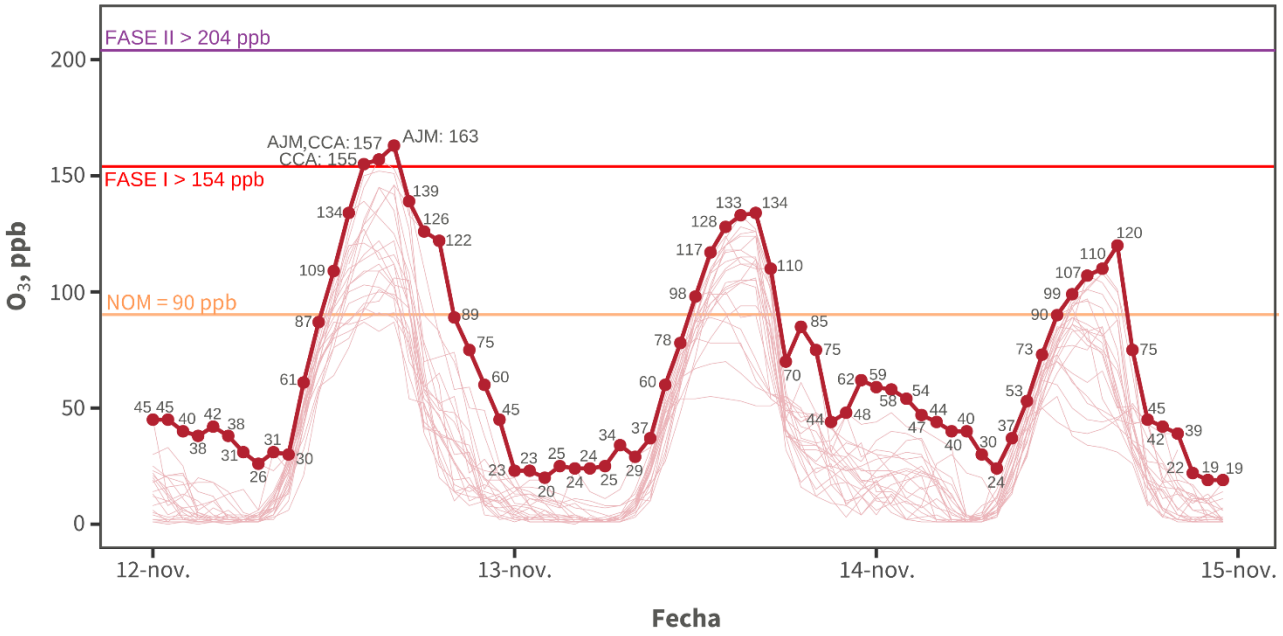


Figura 5.15. Concentración de O_3 del 12 al 14 de noviembre. Las líneas delgadas corresponden a la concentración horaria por estación y la línea gruesa resalta el máximo por hora. Las líneas horizontales son los valores para la NOM, Fases I y II del programa de contingencia.

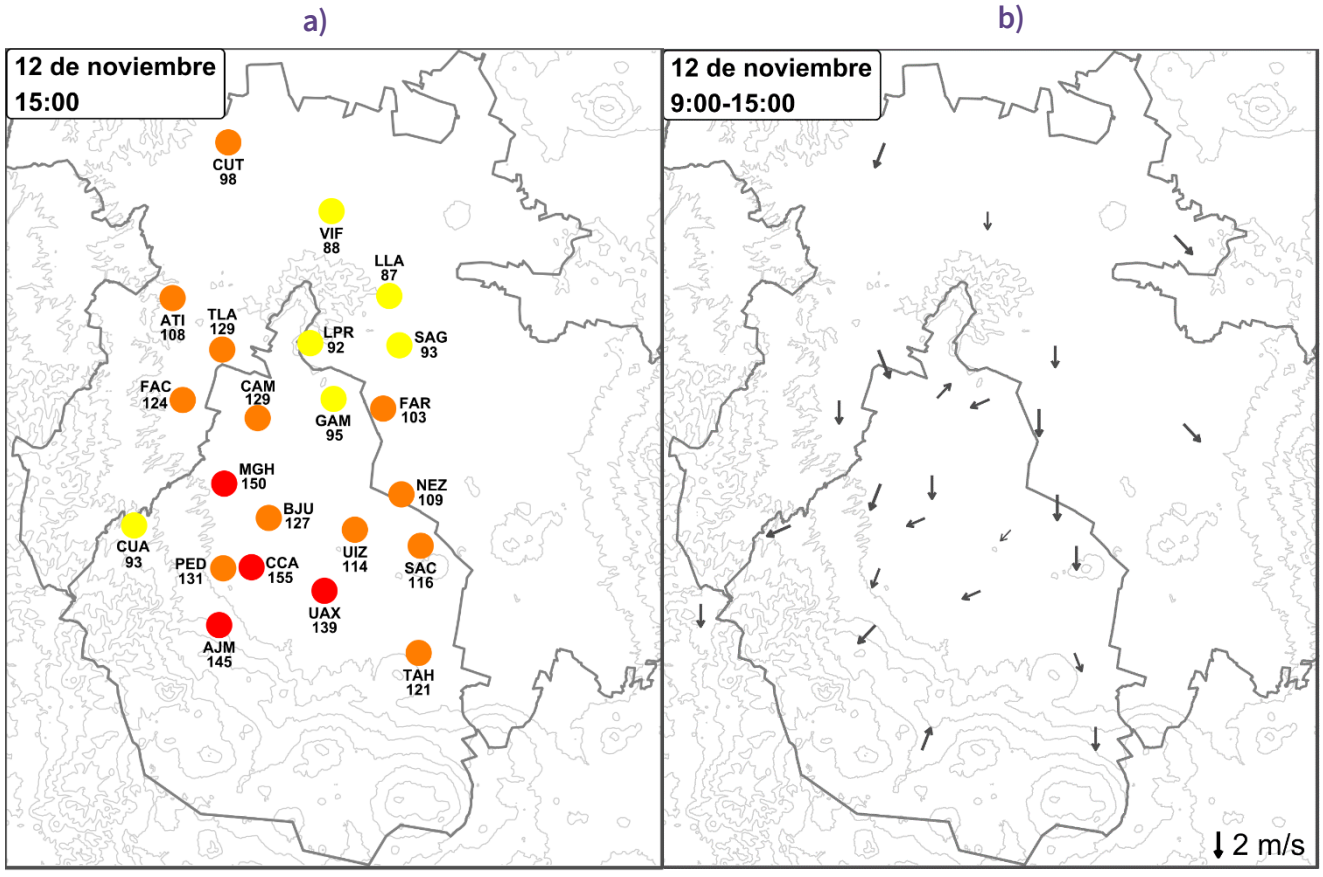


Figura 5.16. a) Máximo de O_3 (ppb) con su categoría (color) del Índice AIRE Y SALUD a las 15:00 h del 12 de noviembre. **b)** Vector promedio del viento del 12 de noviembre entre las 09:00 y 15:00 h (derecha).

CAPÍTULO 6

Depósito atmosférico

Depósito atmosférico y lluvia ácida

Campaña 2022 de la Red de Depósito Atmosférico (REDDA)

La subred del SIMAT encargada de la recolección y análisis del depósito atmosférico se conoce como REDDA, conformada por 16 sitios de monitoreo equipados con dispositivos semiautomáticos para recolectar una muestra del depósito húmedo (lluvia, nieve o granizo). Esta recolección se realiza durante 7 días continuos, después de los cuales, las muestras se envían al laboratorio para análisis fisicoquímico, así como determinación de la composición iónica y acidez.

La campaña de muestreo de REDDA en 2022, que considera los meses de la temporada de lluvias (**mayo a octubre**), se realizó en 13 sitios de monitoreo (**Figura 6.1**), de los 16 sitios con los que cuenta esta subred, esto debido a que después de la pandemia COVID-19, no se han reestablecido operaciones en las estaciones San Nicolás Totolapan (SNT), Diconsa (DIC) y Legaría (IBM). La suficiencia de datos para el 2022 se mantuvo entre el 62 y el 89 %, la cual se puede consultar en la **Tabla A.4.18** del anexo de este informe.

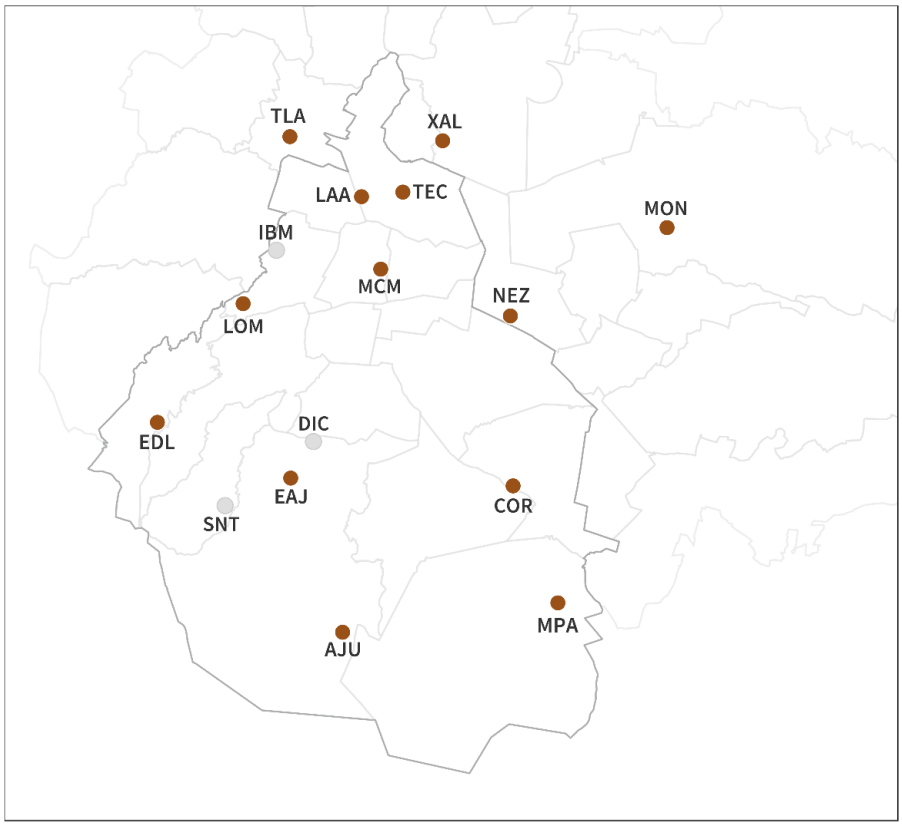


Figura 6.1. Distribución espacial de las estaciones de REDDA. Los sitios en color gris permanecen sin operación durante 2022 posterior a la pandemia.

PRECIPITACIÓN

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) estimaron que la CDMX tuvo una precipitación anual acumulada de 553.1 mm en 2022 (SMN, 2023). Esto es congruente con lo registrado en las estaciones de la REDDA, en las que se determinó que el promedio de lluvia acumulado del 2022 fue de 547 mm, considerando únicamente los meses de mayo a octubre. En el acumulado por estación, los máximos se observaron en los sitios al suroeste de la ZMCM como en Exconvento Desierto de los Leones (EDL) con 970 mm de lluvia, Eco guardas Ajusco (EAJ) con 883 mm y Ajusco (AJU) con 796 mm (**Figura 6.2**).

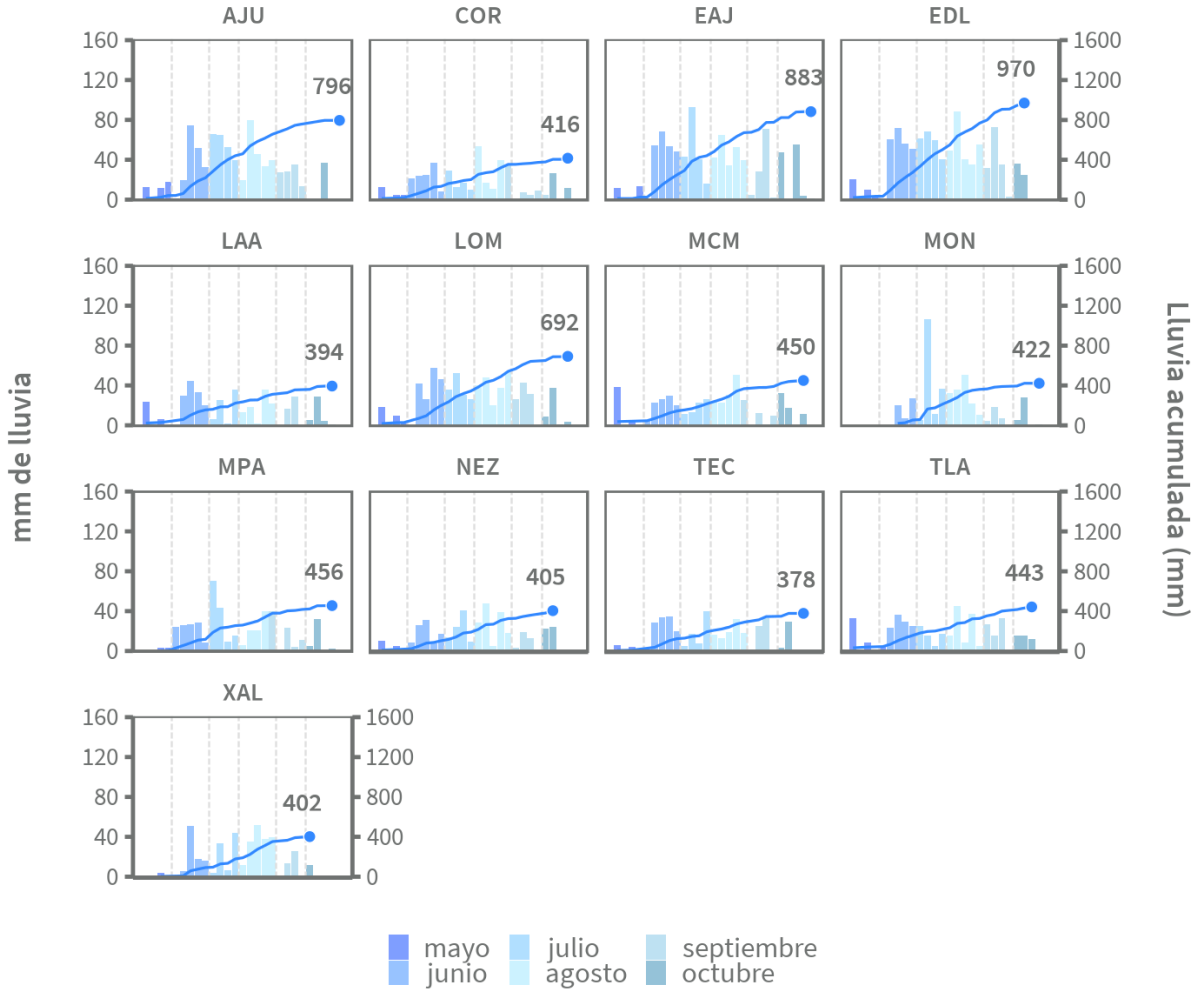


Figura 6.2. Precipitación expresada en mm de lluvia. Precipitación acumulada por semana (barras) y mes (escala de color azul y delimitado por línea punteada en gris claro). La línea azul es la precipitación acumulada total del periodo mayo – octubre 2022 en cada estación.

Los valores mínimos de lluvia acumulada se registraron en Cerro del Tepeyac (TEC) con 378 mm, Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA) con 394 mm y Xalostoc (XAL) con 402 mm (**Figura 6.2**). En la distribución espacial de la lluvia (**Figura 6.3**) se observó mayor precipitación en el suroeste, por el contrario, fue menor en el norte y centro de la Ciudad de México (CDMX), este es un patrón consistente con campañas anteriores de la REDDA.

Este patrón se debe principalmente a la orografía de la CDMX, su distribución de áreas verdes, las cuales se concentran en las zonas boscosas o partes altas de la ciudad y de la dirección de los vientos dominantes que, durante la temporada de lluvias, frecuentemente van hacia el sur y suroeste (**Figura 6.4**). Adicionalmente, existen otros factores como el crecimiento acelerado de la mancha urbana y la deforestación en el suelo de conservación, que provocan el efecto llamado "isla de calor", el cual ocasiona un clima más seco, extremo y con lluvias intensas en las áreas más densamente pobladas de la ciudad (Gutiérrez, 2017).

Por otra parte, la traspiración de los árboles también influye en los patrones de precipitación (Spracklen et al., 2012). Las zonas que concentran vegetación y principalmente árboles aportan mayor vapor de agua a los flujos de viento que transportan la humedad a la atmósfera, la cual posteriormente precipitará (Sheil, 2014). En este sentido, en el sur de la CDMX se encuentran zonas de alto valor ambiental denominadas Áreas Naturales Protegidas, consideradas parte del suelo de conservación de la CDMX, donde se albergan alrededor de 2,500 especies de flora y fauna (Ocampo Cervantes, 2021).

En el análisis mensual de la precipitación en la campaña 2022 de REDDA, durante junio, julio y agosto, se presentaron los máximos con 1721 mm, 1590.3 mm y 1996.1 mm, respectivamente. Las estaciones con mayor aporte al acumulado mensual fueron EDL, EAJ y AJU. Por el contrario, los mínimos de precipitación acumulada fueron en mayo con 299.8 mm y los sitios con menor acumulado durante ese mes fueron Milpa Alta (MPA), XAL y TEC (**Figura 6.4**).

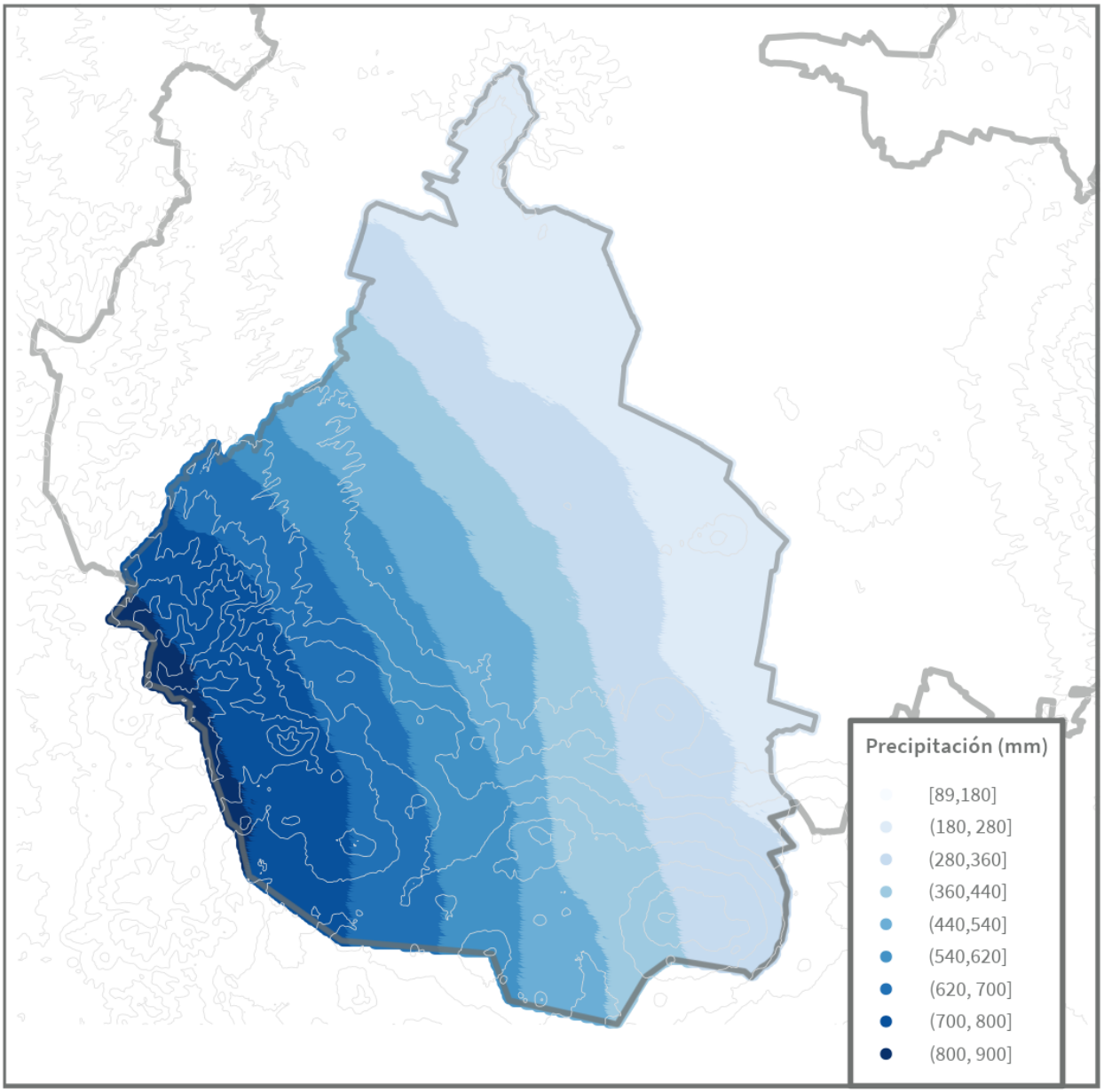


Figura 6.3. Distribución espacial de la lluvia en la Ciudad de México durante 2022. Interpolación por el método de Kriging de los acumulados de precipitación por estación.

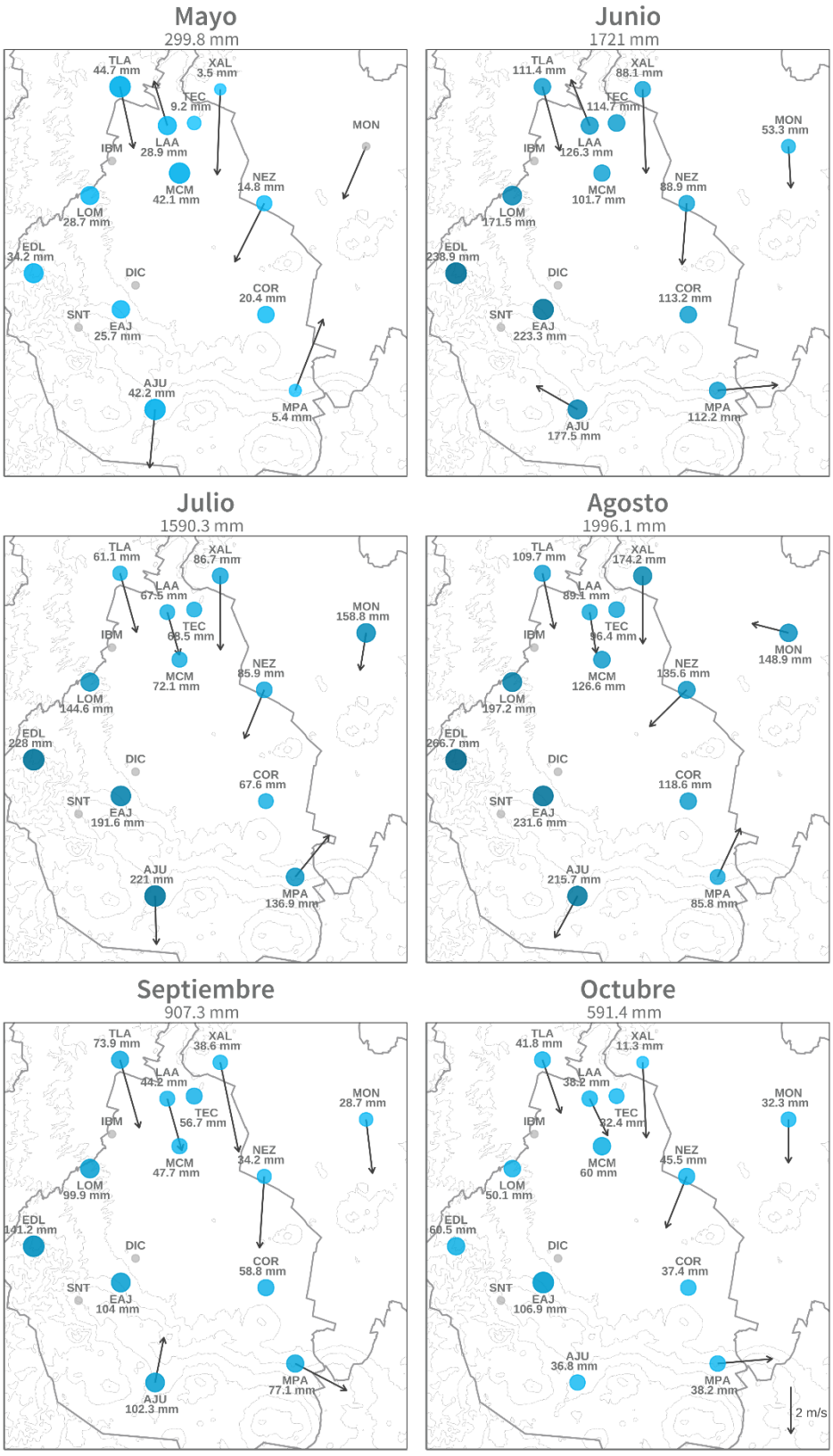


Figura 6.4. Distribución espacial de los acumulados mensuales (mayo-octubre) de precipitación por estación, en algunos sitios de REDDA se calcularon los vectores de viento dominante ya que cuentan con estación meteorológica de REDMET. El resto de los sitios no tienen estación meteorológica o no registraron datos de viento durante el mes.

COMPOSICIÓN IÓNICA

Los iones más abundantes en las muestras recolectadas durante la campaña 2022 en orden descendiente fueron amonio (NH_4^+) con 31.6 %, calcio (Ca^{2+}) con 21.7 %, sulfato (SO_4^{2-}) que obtuvo 20.2 %, nitrato (NO_3^-) con 17.5 %, cloruro (Cl^-) que registró 2.9 %, magnesio (Mg^{2+}) con el 2.1 %, para el potasio (K^+) fue 1.9 %, sodio (Na^+) con el 1.4% y el mínimo fue hidronio (H^+) con el 0.7%.

El NH_4^+ tuvo el máximo acumulado en Montecillos (MON) con el 36.5 % de la masa total de fracción iónica, seguido del sitio EAJ con 36 % y de Museo de la Ciudad de México (MCM) con 32.1 %; en el resto de las estaciones, el porcentaje fue del 29 al 32 %. Para el Ca^{2+}, el mayor porcentaje se observó en LAA con el 26.9 %, seguido de Tlalnepantla (TLA) con 25.2 % y MCM 22.6 %; mientras que la contribución en el resto de los sitios fue del 17 al 21.8 %. En el SO_4^{2-}, el máximo aporte fue del 22.3 % en AJU, después en EDL con el 21.9 % y EAJ con 21.6 %; para los demás sitios, el SO_4^{2-} representó del 15.1 al 21.4 % del total. Para el NO_3^-, el aporte de las estaciones fue del 15.5 al 19.3 % y los sitios con mayor porcentaje fueron CORENA (COR) con 19.3 %, MON registró 18.7 % y AJU con 18.5 % (**Figura 6.5**).

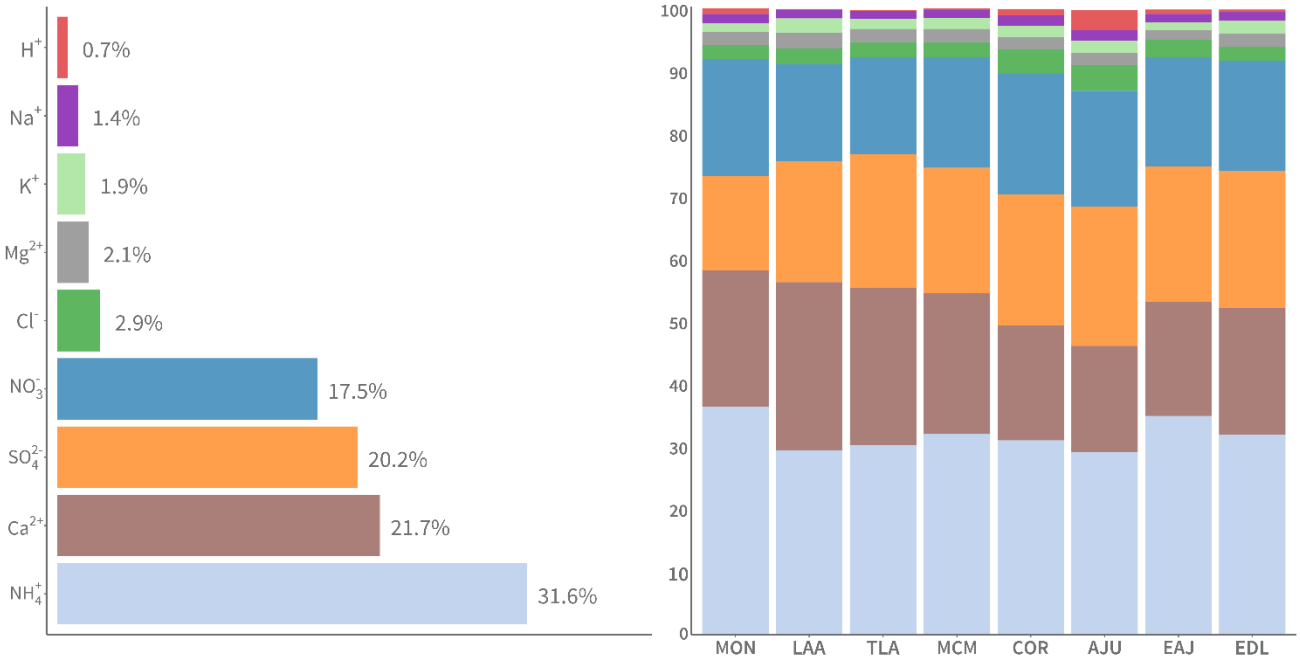


Figura 6.5. Concentración total (µEq/L) de los iones expresada en porcentaje (izquierda) y proporción de los iones por estaciones (derecha).

DEPÓSITO ATMOSFÉRICO HÚMEDO

La deposición atmosférica húmeda es el proceso de disolución y arrastre de compuestos químicos por eventos de lluvia. Este proceso regula la concentración de iones, su tiempo de residencia y distribución; también determina la composición química de la lluvia (Carnelos et al., 2024). Existen dos mecanismos por los cuales ocurre la deposición de los iones:

1. "**Rainout" o eliminación por lluvia.** Ocurre cuando los gases y partículas se incorporan a las gotas de lluvia en la **troposfera**. Las contribuciones del rainout dependen de la cantidad de partículas en la tropósfera, que están determinadas por los vientos y las fuentes de emisión en la trayectoria de la masa de aire.

2. "**Washout" o eliminación por lavado**. Consiste en la retención de aerosoles y disolución de gases en gotas de lluvia situadas en la **capa límite atmosférica**. Sus contribuciones dependen de la concentración máxima de iones en esta capa, así como la magnitud y tipo de lluvia. Este tipo de eliminación será mayor cuando la capa límite esté en su máxima capacidad de carga. Durante un episodio de lluvia, la concentración de iones es mayor en las primeras etapas del evento y luego disminuye hasta alcanzar un valor constante.

El efecto del *washout* se puede observar en los datos de iones en la campaña 2022 (**Figura 6.6**). El acumulado mensual más alto se registró en mayo y disminuye gradualmente en el transcurso de los meses para los iones NH_4^+, Ca^{2+}, Cl^-, Mg^{2+}, Na^+ y K^+. En el caso del SO_4^{2-} y NO_3^- se observó un incremento durante agosto, lo cual es notable en la concentración del H^+.

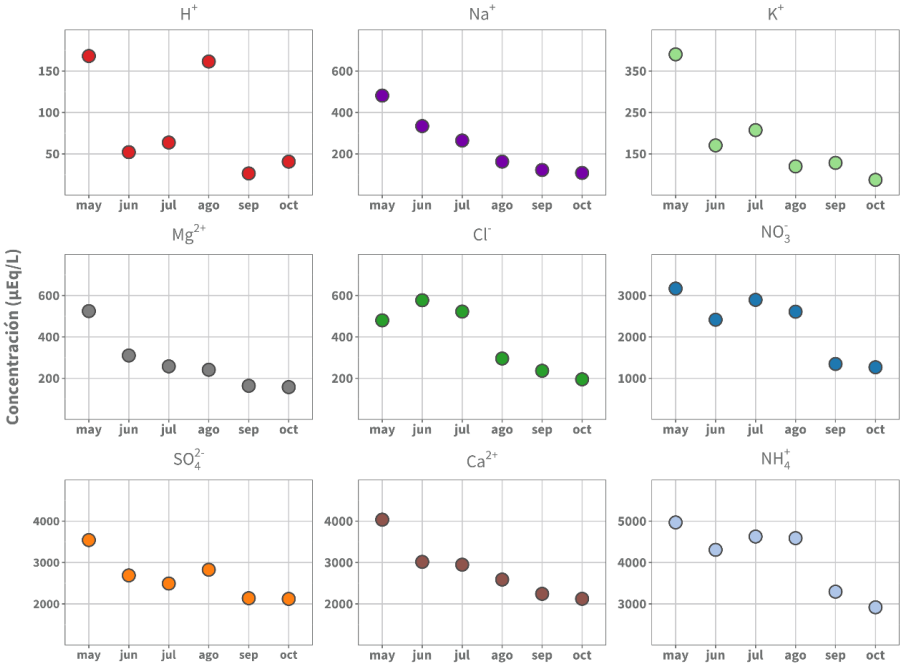


Figura 6.6. Sumatoria de las concentraciones (µEq/L) de cada uno de los iones por mes.

Durante la temporada de lluvia 2022 (mayo a octubre), los promedios del depósito total de los iones expresado en kilogramos por hectárea (kg/ha) fueron, en orden descendente: NO_3^- (13.7 kg/ha), SO_4^{2-} (12.5 kg/ha), NH_4^+ (7.53 kg/ha), Ca^{2+} (5.21 kg/ha), Cl^- (1.35 kg/ha), K^+ (0.616 kg/ha), Na^+ (0.49 kg/ha), Mg^{2+} (0.29 kg/ha) y H^+ (0.009 kg/ha). El máximo de NO_3^- fue de 19.56 kg/ha en LOM y el mínimo de 9.47 kg/ha en TEC. El depósito total más alto para SO_4^{2-} se observó en la estación AJU con 17.57 kg/ha y el mínimo en 5.94 kg/ha en MON.

El máximo de NH_4^+ se presentó en EAJ (10.3 kg/ha), Ca^{2+} en LOM (7.78 kg/ha), Cl^- en AJU (2.58 kg/ha), K^+ también en AJU (0.98 kg/ha), Na^+ en EDL (0.69 kg/ha), Mg^{2+} en EDL (0.41 kg/ha), y H^+ en AJU (0.045 kg/ha). Los mínimos fueron, para NH_4^+ en la estación MON (5.48 kg/ha), Ca^{2+} también en MON (3.55 kg/ha), para Cl^- se registró en el sitio MON (0.66 kg/ha), K^+ fue en XAL (0.39 kg/ha), mientras que en Na^+ y Mg^{2+} también fueron en MON con 0.25 y 0.19 kg/ha, respectivamente, y finalmente el H^+ obtuvo su mínimo en LAA con 0.001 kg/ha (**Figura 6.7**).

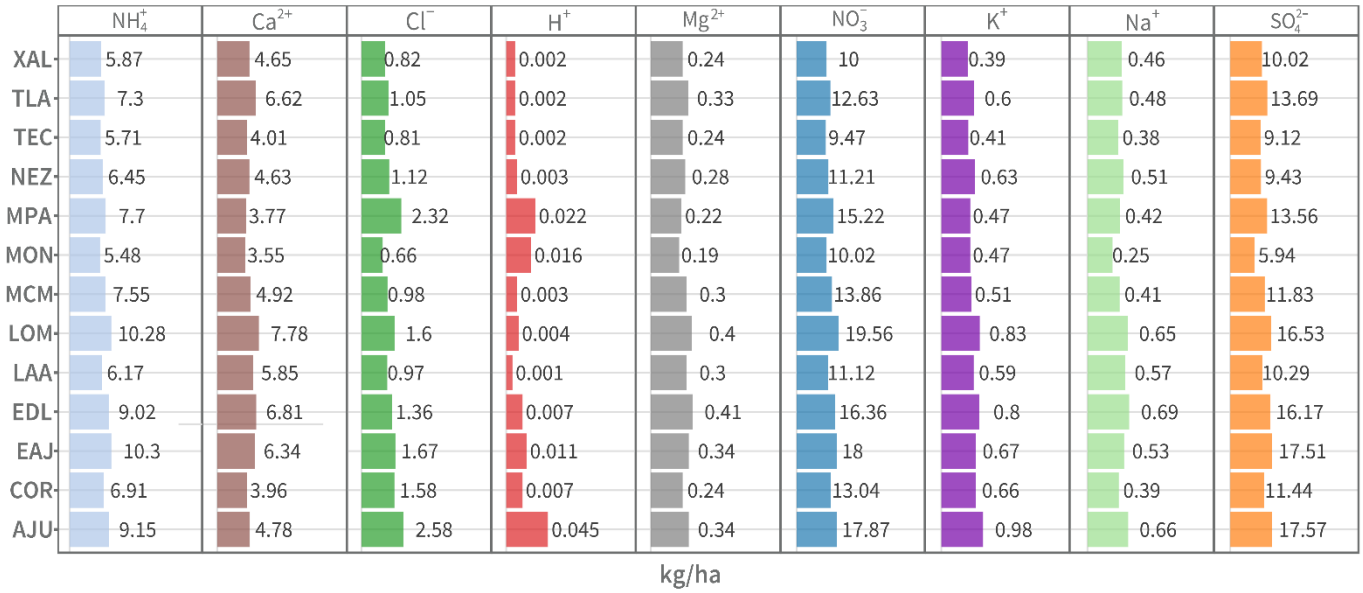


Figura 6.7. Depósito acumulado (kg/ha) por especie iónica y estación durante la campaña 2022

pH

El pH de la lluvia se considera ácido cuando es menor a 5.6 (Diatta et al., 2021; Ramlall et al., 2015) y para la campaña 2022, el 9.3% del total de muestras estuvieron por debajo de este umbral, es decir, con lluvia ácida. El rango del valor pH en las estaciones con lluvia ácida fue de 4.05 a 4.45. Las estaciones con mayor número de muestras ácidas fueron MPA con ocho y AJU que obtuvo cinco. Es importante mencionar que los sitios LOM, TEC, TLA, XAL y LAA no tuvieron muestras con pH menor al umbral.

El mes con mayor cantidad de muestras ácidas fue agosto; sin embargo, en mayo se registraron las muestras con valor de pH más bajo (**Figura 6.8**), esto ocurre debido a que las primeras lluvias de la temporada están influenciadas por el efecto de eliminación por lavado ("washout") en la atmósfera y las concentraciones de los iones tienden a ser más altas.

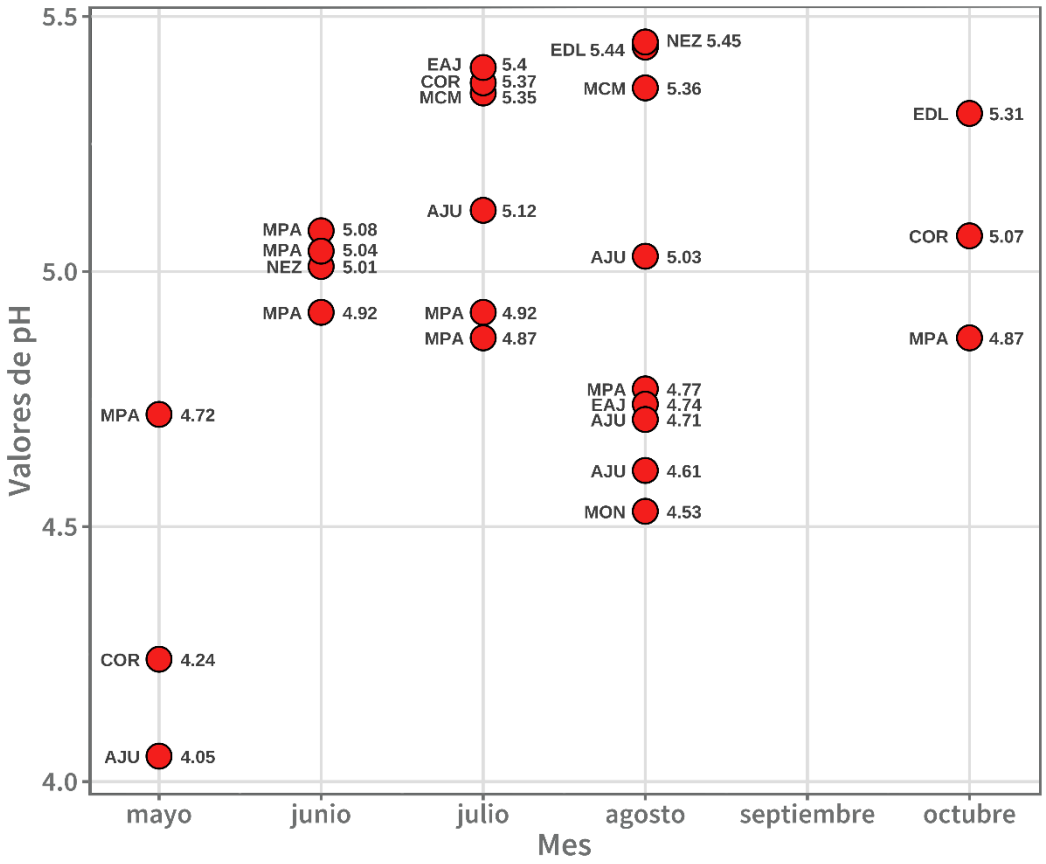


Figura 6.8. Distribución mensual de los valores de pH menores a 5.6 (valores ácidos)

El cálculo por estación del pH ponderado se realiza para observar la distribución espacial de la lluvia ácida del 2011 a 2022, mediante una interpolación por el método IDW (*Inverse Distance Weighting*) y con esto se observó que el suroeste y sur de la ZMCM son las regiones donde es frecuente encontrar muestras ácidas. En este periodo de estudio, el pH ponderado tuvo una variación entre 4.1 y 6.8; en los años 2011 al 2016 se observan tonos amarillo ocre, naranjas y rojos, lo cual indica valores de pH considerablemente menores al umbral de 5.6 y son más ácidos que en el periodo 2017 a 2022 (**Figura 6.9** y **6.10**). En los años 2012, 2013 y 2015, se observaron valores ácidos de pH ponderado en la totalidad de la superficie de la ZMCM; mientras que del 2017 al 2022 predominan los tonos verdes que indican pH ponderado superior a 5.6.

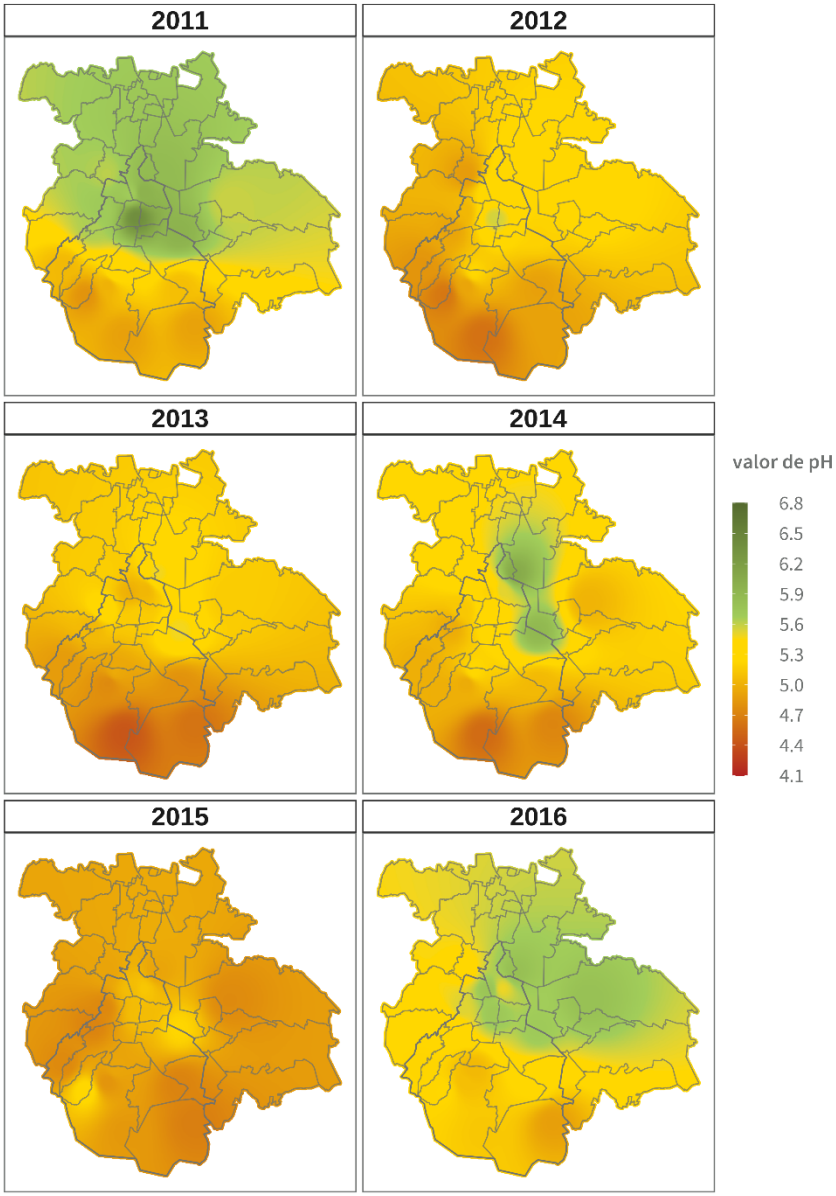


Figura 6.9. Distribución espacial de la lluvia ácida en la ZMCM del 2011 al 2016. Los tonos rojos, anaranjado y amarillos indican la presencia de lluvia ácida (pH menor a 5.6).

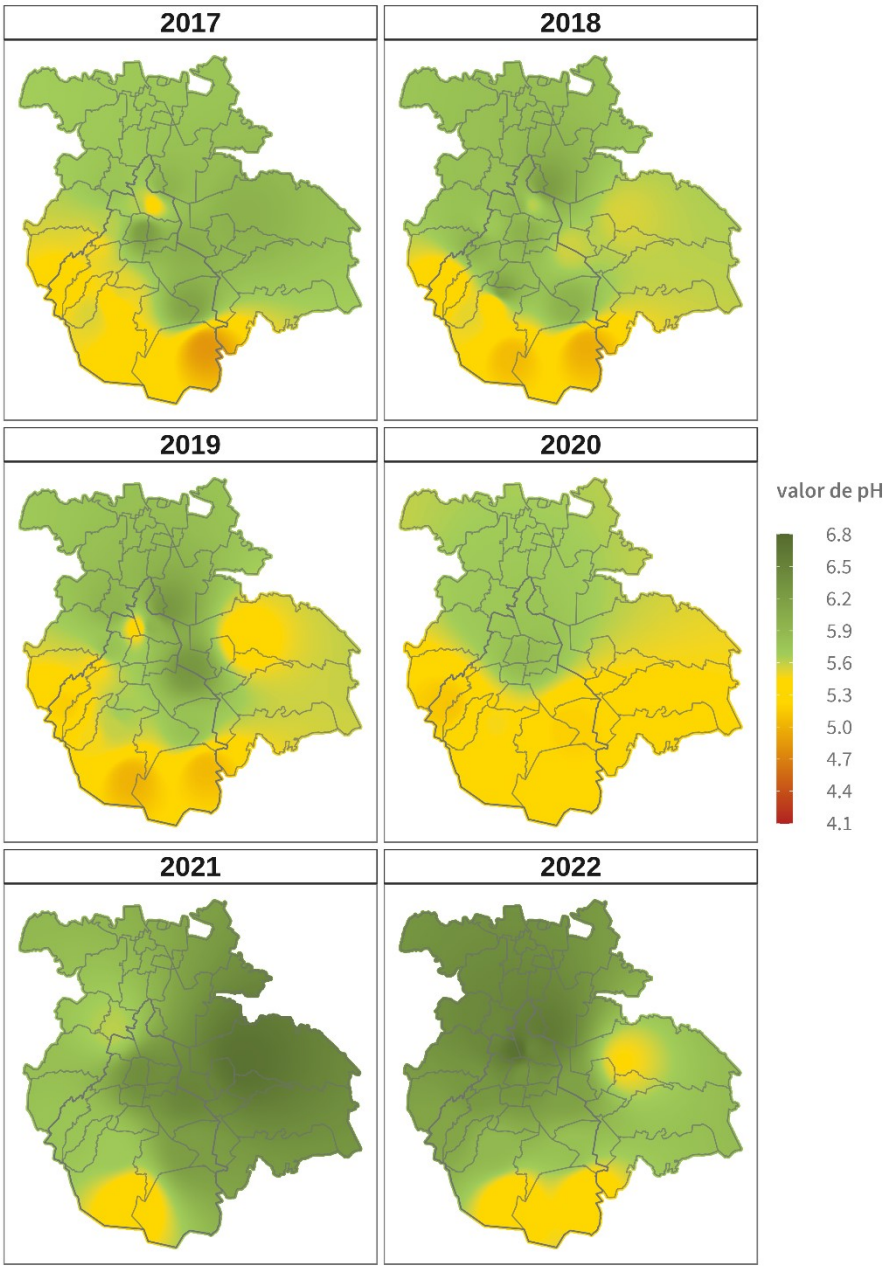


Figura 6.10. Distribución espacial de la lluvia ácida en la ZMCM del 2017 al 2022. Los tonos rojos, anaranjado y amarillos indican la presencia de lluvia ácida (pH menor a 5.6).

CAPÍTULO 7

Modelación

Evaluación del pronóstico de ozono (O_3)

El Sistema de Pronóstico de Calidad del Aire de la Ciudad de México (AQFS-CDMX) fue concebido como una herramienta indispensable para la gestión de la calidad del aire. Dentro de los objetivos del sistema el más importante tiene que ver con la identificación anticipada de eventos de alta contaminación por ozono con un riesgo potencial para la salud pública. ,Otros usos del sistema tienen que ver con la simulación de escenarios y el diseño de políticas de gestión.

Debido a la importancia de los objetivos del sistema, es necesario realizar una evaluación periódica para verificar su precisión, exactitud y confiabilidad, con el fin de usarlo de forma adecuada en la toma de decisiones para la gestión de la calidad del aire.

Desde la implementación del AQFS-CDMX en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) en 2017, los datos de salida del pronóstico se corrigen operacionalmente mediante la aplicación del filtro de Kalman (kf) (Delle et al., 2006), con la finalidad de reducir los errores sistemáticos y mejorar su precisión.

En este capítulo, se presentan los resultados del análisis del pronóstico de O_3 de la ZMCM durante la temporada de ozono 2022 (15 de febrero al 15 de junio) y su evaluación integral de las salidas considerando los datos de dos formas: sin corrección y con corrección por filtro de Kalman en 24 y 48 horas. Esta evaluación se realiza mediante la aplicación de métodos estadísticos que proporcionan un panorama de la precisión y exactitud de la diferente forma de evaluar el pronóstico desde diferentes perspectivas.

A continuación, se presentan de manera resumida los diversos indicadores estadísticos de desempeño, así como gráficos en los que se comparan las salidas evaluadas comparándolos con el promedio de datos medidos por las estaciones de monitoreo (observados) (Carslaw, D.C., 2019),.

Evaluación de los valores máximos diarios

En la temporada de ozono de 2022, el 81% de los días (98 de 121) presentaron valores máximos superiores al límite de la NOM vigente para O_3 (90 ppb, NOM-020-SSA1-2021). En la serie de tiempo de los máximos diarios (**Figura 7.1**), se puede ver que la mayoría de estos días fueron correctamente detectados tanto por los pronósticos sin corrección como con filtro de Kalman. Por lo tanto, estos pronósticos son capaces de reproducir de forma correcta la tendencia y el comportamiento de la concentración máxima diaria observada en la mayor parte de la temporada.

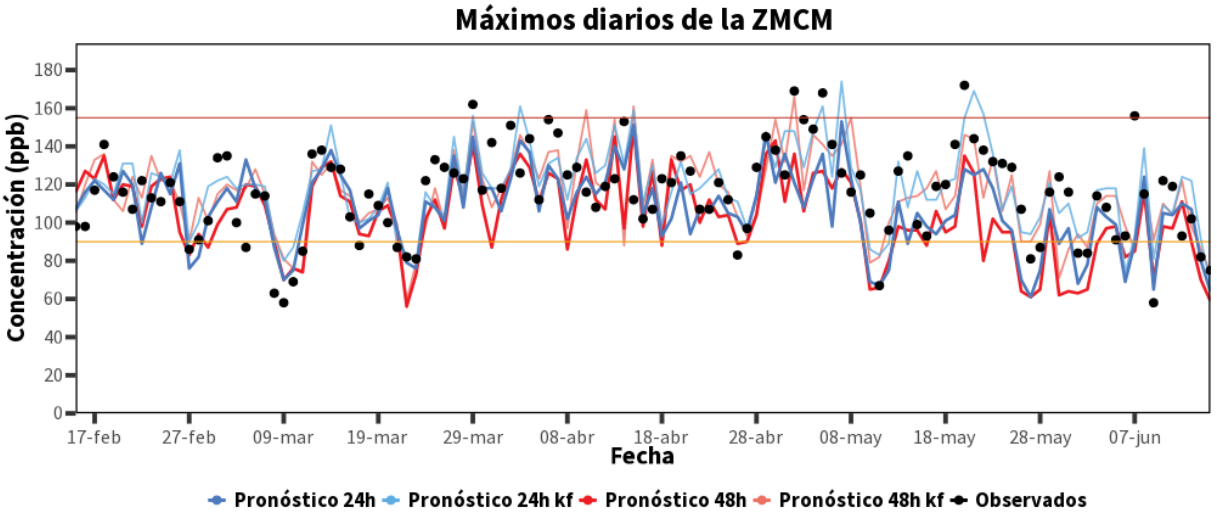


Figura 7.1. Serie de tiempo de los máximos diarios pronosticados y observados del 15 de febrero al 15 de junio. La línea amarilla representa el valor de la NOM (90 ppb) y la línea roja el valor de Fase I de contingencia (154 ppb).

Los máximos diarios observados en el periodo analizado se distribuyen en un rango aproximado entre 60 ppb y 170 ppb. En los diagramas de caja en la **Figura 7.2** se presentan las distribuciones de los pronósticos en comparación con los observados y se puede notar que la distribución de los datos es similar; sin embargo, los corregidos por filtro de Kalman son más cercanos a lo observado en la realidad. Además, los pronósticos corregidos presentaron valores de Fase I de contingencia similares a lo observado (el cuartil superior se encuentra por arriba de la línea roja, como en lo observado **Figura 7.2**) a diferencia de los pronósticos sin corregir.

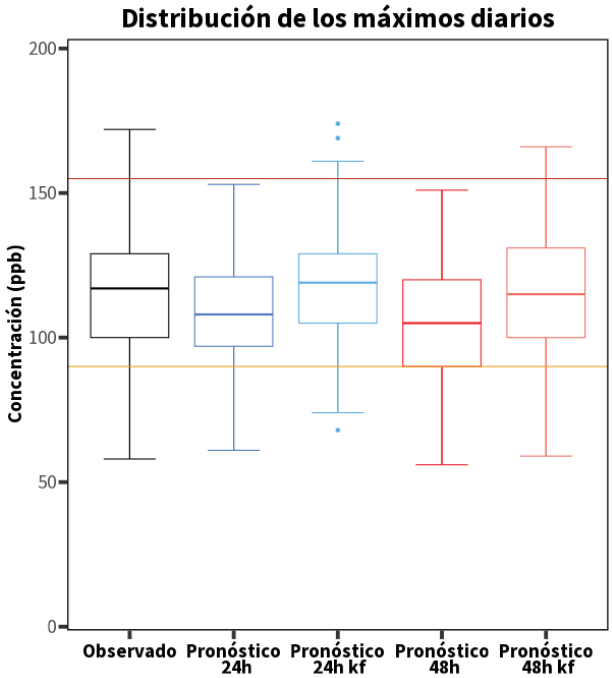


Figura 7.2. Distribución de los máximos diarios pronosticados y observados. La línea amarilla representa el valor de la NOM (90 ppb) y la línea roja el valor de Fase I de contingencia (154 ppb).

Evaluación del desempeño general

Para evaluar el desempeño general de cada pronóstico, se utilizaron dos métricas: el error medio absoluto normalizado (normalised Mean Absolute Error, **nMAE**) y la diferencia relativa absoluta por día. El **nMAE** representa la proporción que tiene la diferencia entre el pronóstico y el observado con respecto a los datos observados y se calcula con la siguiente fórmula:

$$\boldsymbol{nMAE} = \frac{\sum_{i=1}^{N} |Pron_i - Obs_i|}{\sum_{i=1}^{N} Obs_i}$$

El **rendimiento** se obtiene como el porcentaje de acierto promedio y se considera como el complemento del **nMAE**. Por lo tanto, este rendimiento se calcula como:

$$\boldsymbol{rend}(\%) = (1 - nMAE) * 100\%$$

La **diferencia relativa absoluta** es la proporción de la diferencia diaria entre el pronóstico y el observado con respecto a los datos observados por día (i), y se obtiene con la siguiente fórmula:

$$\boldsymbol{dif}_i = \frac{|Pron_i - Obs_i|}{Obs_i}$$

Una vez calculada la diferencia relativa absoluta diaria, se obtiene el **porcentaje de los días** que tuvieron una diferencia menor o igual a 0.2 (20 % del valor observado). Esta métrica tiene como objetivo determinar la proporción de días de la temporada de ozono en los que el modelo AQFS-CDMX pronosticó correctamente los máximos diarios con una diferencia reducida entre el valor simulado y el observado. El porcentaje se calculó con la fórmula:

$$\%\boldsymbol{dias} = \frac{no.dias_{dif \leq 0.2}}{no.dias_{total}} * 100\%$$

Los resultados del rendimiento de los pronósticos (**Tabla 7.1**) muestran que se tiene un rendimiento bueno en las salidas sin corrección; sin embargo, con la aplicación del filtro de Kalman mejora tanto el rendimiento, como el porcentaje de días que tienen una diferencia menor al 20%. El resultado muestra que entre el 70 al 80% de los días de la temporada de ozono, el modelo AQFS-CDMX logró pronosticar el máximo diario con una diferencia menor al 20 % entre el valor observado y el simulado. En general, los resultados de ambas métricas indican que todos los pronósticos son capaces de simular los máximos diarios observados y que el mejor desempeño fue en los pronósticos de menor tiempo, 24 horas, ya sea con o sin filtro de Kalman.

Tabla 7.1. Rendimiento general de los pronósticos evaluados.

Pronóstico	Rendimiento	Porcentaje de días ≤ 0.20
24h	86 %	79 %
24h kf	87 %	80 %
48h	84 %	70 %
48h kf	87 %	77 %

EVALUACIÓN CON ESTADÍSTICOS DISCRETOS

La evaluación estadística permite determinar la cercanía entre los datos del pronóstico y lo observado, en este caso las métricas empleadas fueron: el sesgo promedio (**MB**), el error promedio absoluto (**MAE**), la raíz del error cuadrático medio (**RMSE**), el coeficiente de correlación (**r**), el coeficiente de eficiencia (**COE**) y el índice de coincidencia (**IOA**). Estas métricas han sido utilizadas en las evaluaciones anteriores del AQFS-CDMX realizadas en los informes anuales, por lo que se pueden consultar sus definiciones en los informes del 2017 y 2019 (SEDEMA, 2018; 2022). En la **Tabla 7.2** se muestran los resultados de estas métricas para cada uno de los pronósticos evaluados durante la temporada de ozono 2022.

Tabla 7.2. Métricas estadísticas generales de los pronósticos evaluados.

Pronóstico	MB	MAE	RMSE	r	COE	IOA
24h	3.6	13.5	17.6	0.81	0.44	0.72
24h kf	0.6	10.8	14.7	0.87	0.55	0.78
48h	2.9	14.0	18.2	0.79	0.42	0.71
48h kf	-0.07	11.4	15.6	0.85	0.52	0.76

Los resultados del sesgo promedio (**MB**) indican una ligera sobrestimación de los pronósticos, excepto en el pronóstico de 48 horas corregido con Kalman, en el caso de los pronósticos este sesgo es mayor sin la corrección. En general, el sesgo promedio tuvo valores cercanos a cero en todos los pronósticos, lo cual indica que la desviación promedio respecto al observado es pequeña.

En cuanto al error promedio absoluto (**MAE**) y la raíz del error cuadrático medio (**RMSE**), se observa lo mismo que en la métrica anterior, en los pronósticos corregidos con filtro de Kalman se presenta una menor desviación con respecto al observado, siendo el pronóstico de 24 horas con Kalman el que presentó un menor grado de error en ambas métricas. El comportamiento es similar en el coeficiente de correlación (**r**), ya que los pronósticos corregidos presentaron una mayor correlación y, en este caso, el pronóstico de 24 horas también obtuvo el mayor coeficiente **r**.

El coeficiente de eficiencia (**COE**) tuvo valores cercanos a 0.5 en todos los pronósticos, lo cual indica que, en general, han podido pronosticar adecuadamente el patrón que sigue la concentración observada. De manera similar, se determinó un buen rendimiento en los pronósticos de acuerdo con el índice de coincidencia (**IOA**), pero en las salidas corregidas por filtro de Kalman se tuvieron los mejores resultados en esta métrica.

Comparación del patrón diurno

El análisis de los perfiles horarios (**Figura 7.3**) muestra la comparación del patrón diurno de cada pronóstico, este perfil corresponde al promedio de todas las estaciones en cada hora del día. Se observó que los pronósticos sin corrección tienden a sobrestimar el patrón nocturno (de las 00:00 a la 09:00 h y a partir de las 21:00 h), mientras que el pronóstico de 48 horas subestima el ozono durante las horas de máxima concentración (de las 11:00 a las 17:00 h). En cuanto a los pronósticos corregidos por filtro de Kalman, se puede notar que reproducen el patrón diurno con mayor exactitud durante la mayor parte del día, especialmente en el pronóstico de 24 horas; sin embargo, el pronóstico de 48 horas tiende a subestimar durante las horas de máxima concentración.

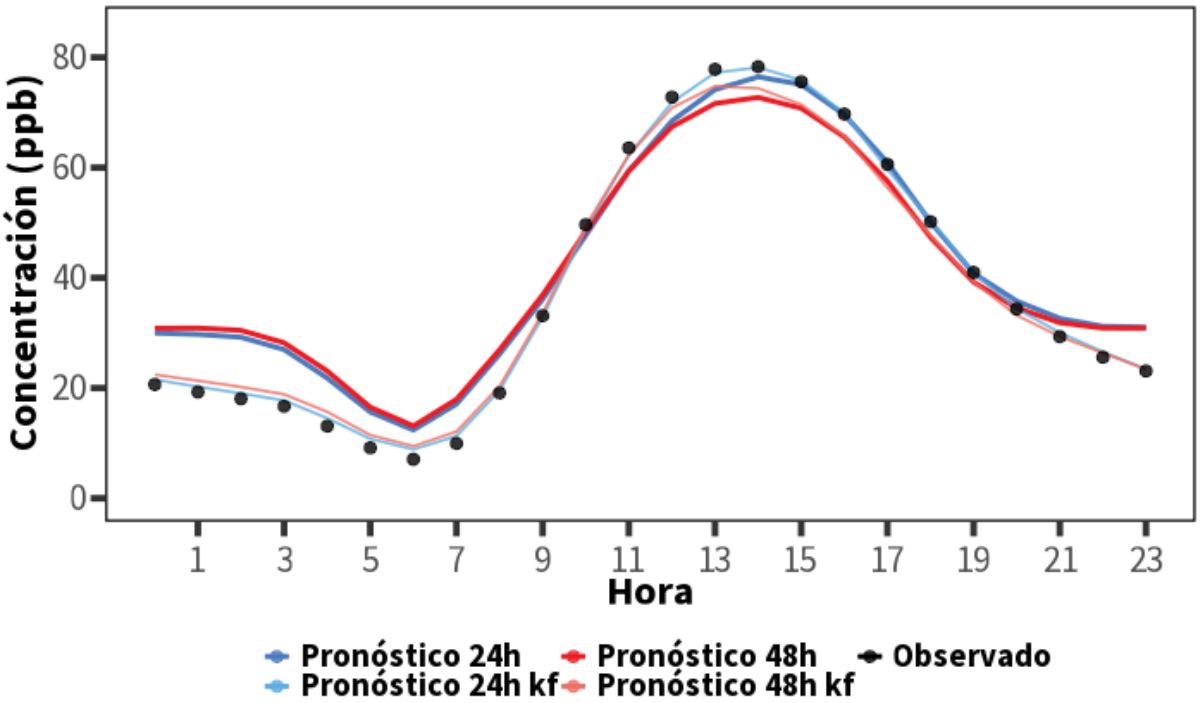


Figura 7.3. Perfiles horarios generales observados y pronosticados.

Evaluación por diagramas de Taylor

El diagrama de Taylor es un gráfico en el que se resume el desempeño de cada pronóstico mediante la visualización del **coeficiente de correlación, el RMSE y la desviación estándar**. En la **Figura 7.4** se presenta este diagrama para los pronósticos evaluados en este capítulo y en el cual se puede ver que el pronóstico de 24 horas corregido con Kalman obtuvo el mejor desempeño, ya que su valor es el más cercano a la línea de observados (línea negra punteada).

En general, todos los pronósticos presentaron valores similares en todas las métricas, lo que es consistente con los resultados de la **Tabla 7.2**, y sólo tuvieron mayor diferencia en su desviación estándar, especialmente entre las salidas del modelo con y sin corrección del filtro de Kalman.

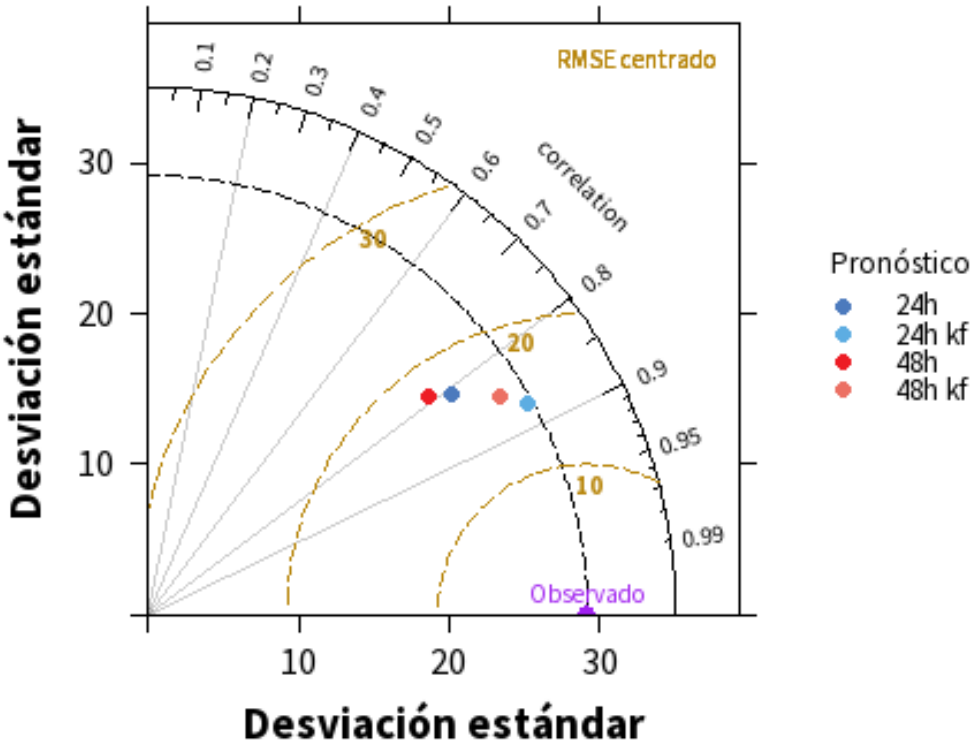


Figura 7.4. Diagrama de Taylor de los pronósticos evaluados.

Evaluación de diagramas de cuantiles condicionales

En las gráficas de cuantiles condicionales se presenta la distribución de los valores pronosticados y observados en diferentes intervalos, que están dados por cada segmento del histograma de los valores observados. En las gráficas de cuantiles para cada uno de los pronósticos evaluados (**Figura 7.5**), se nota una correspondencia entre los pronósticos y las concentraciones observadas, hasta alrededor de 100 ppb (comparación entre línea roja y línea azul). Por encima de este valor, todos los pronósticos tienden a sobrestimar la concentración observada, ya que la línea roja va hacia la derecha de la línea azul, y las salidas corregidas por Kalman son las que alcanzaron los valores más altos.

En cuanto a los histogramas, también se puede ver que los pronósticos corregidos presentan una mayor similitud con los observados en comparación con los pronósticos sin corrección (comparación entre histogramas con relleno gris y con el contorno azul).

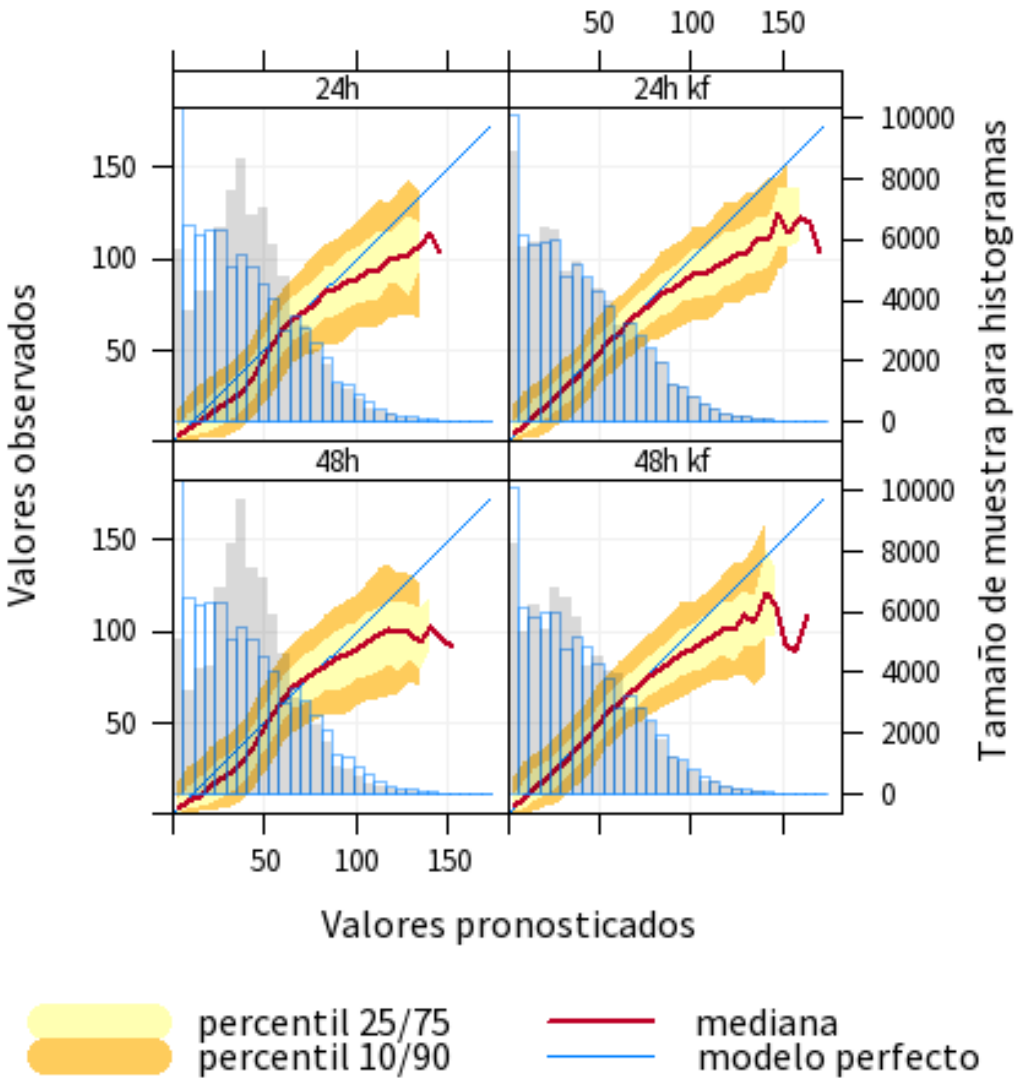


Figura 7.5. Gráficas de cuantiles condicionales de los pronósticos evaluados.

EVALUACIÓN CATEGÓRICA

La evaluación categórica consiste en evaluar el desempeño de los pronósticos con base en si detectan que se superó o no, un umbral específico. En este caso, el umbral evaluado es la concentración de ozono del valor de la NOM vigente en el año de 2022, que es de 90 ppb, y las métricas utilizadas fueron: Exactitud (**A**), Precisión (**Pr**), Tasa de aciertos (**H**), Tasa de falsa alarma (**FAR**), Índice de éxito crítico (**CSI**) y Sesgo (**B**). Los valores de estas métricas se obtienen a partir del conteo de casos dentro de los cuadrantes en la gráfica de dispersión; estos cuadrantes son el resultado de la división en los gráficos de dispersión de Observados vs. Pronosticados, con el umbral establecido en 90 ppb (**Figura 7.6**).

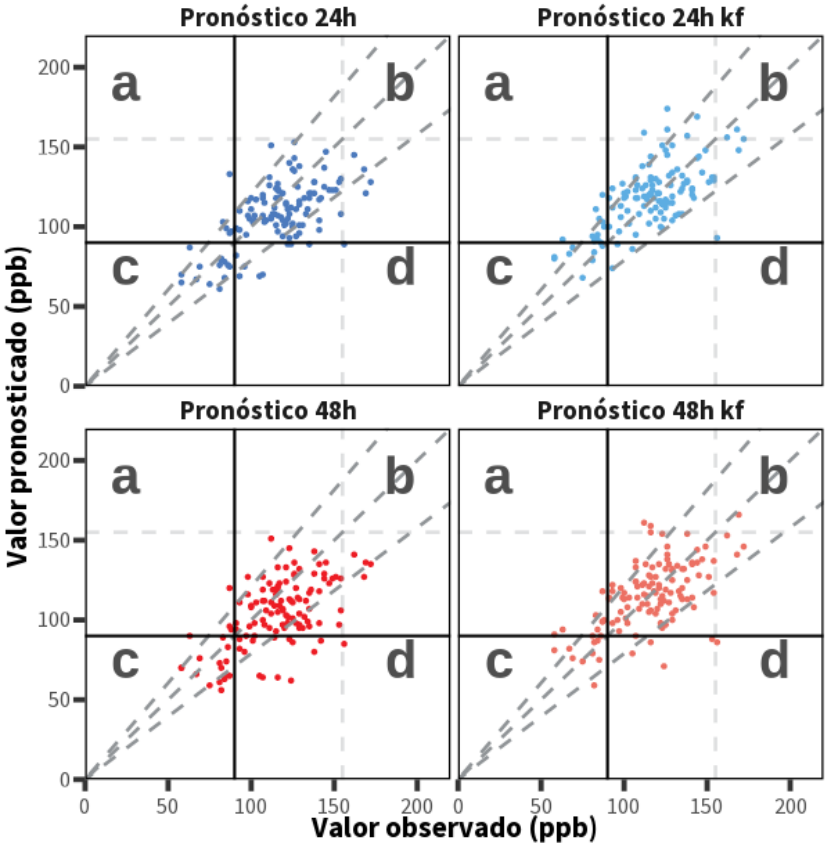


Figura 7.6. Gráficas de dispersión de máximos diarios observados y pronosticados.

En la **Tabla 7.3** se presentan los resultados de las métricas de evaluación categórica de los datos de los pronósticos durante la temporada de ozono 2022. La Exactitud (**A**) fue cercana al 90 % en la mayoría de los pronósticos, lo cual indica una buena capacidad para detectar si en un día se superará o no el valor límite establecido. En los resultados de los gráficos de dispersión (**Figura 7.6**) se puede ver que el **cuadrante b** contiene más casos, lo cual indica que la mayoría de días en los que se rebasó el umbral de la NOM, sí fueron correctamente pronosticados. Esto se confirma en las métricas de Precisión (**Pr**) y Tasa de aciertos (**H**), que evalúan sólo los casos donde se supera la NOM. En estas dos métricas, la mayoría de los pronósticos tuvieron porcentajes por encima del 90 % y el pronóstico de 48 horas fue el que acertó en la mayoría de las veces al predecir valores superiores a 90 ppb, mientras que el modelo de 24 horas con Kalman, fue el que detectó mejor los observados mayores a la NOM.

El Índice de éxito crítico (**CSI**) mide la proporción de acierto en simulados y en observados, esta métrica obtuvo valores mayores al 80 % en todos los pronósticos, lo cual es consistente con el buen desempeño de la Precisión (**Pr**) y la Tasa de aciertos (**H**).

En contraste, se obtuvieron valores bajos en la Tasa de falsa alarma (**FAR**), menores al 10%, lo cual también confirma el buen desempeño de los pronósticos, ya que presentaron baja proporción de falsas alertas, es decir, pocos casos pronosticados que superan la NOM y que no ocurrieron. Finalmente, con el sesgo (**B**) se cuantificó el grado de subestimación (**B** < 1) o sobrestimación (**B** > 1) de los casos que superaron el umbral establecido; en esta métrica, el valor ideal es 1. Los resultados para el sesgo (**B**) obtuvieron valores cercanos a 1 para todos los pronósticos, lo cual indica que es poco probable que se subestime o sobrestime la ocurrencia de casos que superen el valor de la NOM durante la temporada de ozono.

Tabla 7.3. Resultados de las métricas de evaluación categórica de los pronósticos evaluados.

Pronóstico	A (%)	Pr (%)	H (%)	FAR (%)	CSI (%)	B
24h	88.4	94.9	91.2	5.1	86.9	0.96
24h kf	89.3	90.8	97.1	9.2	88.4	1.07
48h	84.3	96.6	84.3	3.4	81.9	0.87
48h kf	88.4	92.3	94.1	7.7	87.3	1.02

COMPORTAMIENTO DEL PRONÓSTICO DURANTE LAS CONTINGENCIAS ATMOSFÉRICAS DE O_3

Durante la temporada de ozono 2022 se presentaron cinco días en los que se rebasó el valor de activación de contingencia (**FI >154 ppb**); estos días corresponden al 29 de marzo, el 2, 5 y 20 de mayo, así como el 7 de junio. Tres de estos días fueron detectados por el pronóstico de 24 horas y uno por el de 48 horas con filtro Kalman, mientras que el 7 de junio no fue detectado por ningún pronóstico, ya que todos subestimaron la concentración máxima para ese día (**Tabla 7.4**).

Tabla 7.4. Concentración máxima observada y pronosticada (ppb) en las fechas que se superó la Fase I de contingencia durante la temporada de ozono.

Fecha	Observado	24h	24h KF	48h	48h KF
2022-03-29	162	145	156	141	153
2022-05-02	169	121	148	136	166
2022-05-05	168	136	161	127	141
2022-05-20	172	128	155	135	146
2022-06-07	156	89	87	85	82

En total, el pronóstico de 24 horas corregido por filtro de Kalman predijo ocho días con valores de contingencia, de los cuales acertó en tres, lo que corresponde a un 38 % de efectividad para detectar correctamente estos días (**Tabla 7.5**). Mientras que el pronóstico de 48 horas con Kalman acertó en uno de los cuatro días que simuló valores superiores a 154 ppb; y finalmente, los pronósticos sin corrección no detectaron ningún día de contingencia.

Tabla 7.5. Desempeño de los pronósticos en días de contingencia durante la temporada de ozono.

Pronóstico	Días > 154 ppb	Días con acierto	% acierto
24 h	0	0	0 %
24 h kf	8	3	38 %
48 h	0	0	0 %
48 h kf	4	1	25 %

Adicionalmente, se presentaron dos días fuera de la temporada de ozono en los que se registraron valores de contingencia. Ambos días fueron correctamente detectados por el pronóstico de 24 horas corregido con Kalman y solamente uno de ellos por el modelo de 24 horas sin corrección (**Tabla 7.6**). Es importante señalar que, en estos días, las concentraciones simuladas por dichos pronósticos fueron muy cercanas a las observadas.

Tabla 7.6. Concentración máxima observada y pronosticada (ppb) en las fechas que se superó la Fase I de contingencia fuera de la temporada de ozono.

Fecha	Observado	24h	24h kf	48h	48h kf
2022-10-23	157	158	158	137	144
2022-11-12	163	136	161	131	142

En la **Tabla 7.7** se presenta el total de días en los que se pronosticó contingencia durante todo el 2022. El modelo de 24 horas con Kalman fue el que más veces predijo valores superiores al límite de Fase I, además fue el que tuvo más aciertos. Los demás pronósticos acertaron en menor medida; mientras que, el pronóstico de 48 horas sin corrección no tuvo aciertos en todo el año.

Tabla 7 7. Desempeño de los pronósticos en días de contingencia por O_3 durante 2022.

Pronóstico	Días > 154 ppb	Días con acierto	% acierto
24 h	4	1	25 %
24 h kf	16	5	31 %
48 h	2	0	0 %
48 h kf	11	1	9 %

CONCLUSIÓN

En este capítulo se presentó la evaluación del desempeño de los pronósticos durante la temporada de ozono del año 2022 desde varias perspectivas, con la finalidad de conocer las diferencias de éstos con respecto a los datos observados durante la temporada de ozono. En resumen, se obtuvo un buen desempeño de todos los pronósticos, con una mejoría notable cuando se aplica el postproceso del filtro de Kalman. Se determinó que el pronóstico de 24 horas presentó un mejor desempeño cuando se le aplica esta corrección y también demostró replicar mejor los patrones diurnos en comparación con los demás modelos; además, de acuerdo con la evaluación categórica, fue el que detectó con mayor confiabilidad cuando se superó el valor límite de la NOM.

Sin embargo, a pesar de aplicar este postproceso, aún es difícil ser certero en la predicción de los días con valores con concentraciones altas >154 ppb, que son los que se presentan durante las contingencias. Esto se puede ver claramente en los gráficos de cuantiles condicionales, en donde la mediana de todos los pronósticos se separa del modelo perfecto en valores superiores a 100 ppb. De igual manera, en la evaluación del desempeño en días de contingencia se observó que los modelos fueron certeros en menos de la mitad de los días en los que pronosticaron una contingencia. Este comportamiento puede ser aceptable, ya que los valores de contingencia son considerados atípicos, pero es importante realizar también una mejora a los pronósticos desde los insumos utilizados para su generación, como lo son los inventarios de emisiones, el modelo de transporte fotoquímico y el modelo meteorológico.

Finalmente, es importante comprender que estos pronósticos son herramientas complementarias que funcionan como una guía para la toma de decisiones, y que su fiabilidad dependerá del desempeño que tengan a lo largo del tiempo. Sin embargo, es necesario buscar tener la menor incertidumbre posible con el objetivo de ofrecer una mejor información y otorgar mayor protección a la salud de la población.

REFERENCIAS

Citas bibliográficas

REFERENCIAS

Agency for Toxic Substances and Disease Registry, (ATSDR). (2014). *Medical Management Guidelines for Nitrogen Oxides*. https://wwwn.cdc.gov/TSP/MMG/MMGDetails.aspx?mmgid=394&toxid=69.

American Meteorological Society, (AMS). (2021). *Precipitation.* https://www.ametsoc.org/index.cfm/ams/publications/glossary-of-meteorology/.

American Lung Association. (2024a). *Sulfur Dioxide.* https://www.lung.org/clean-air/outdoors/what-makes-air-unhealthy/sulfur-dioxide.

American Lung Association. (2024b). *Carbon Monoxide.* https://www.lung.org/clean-air/indoor-air/indoor-air-pollutants/carbon-monoxide.

American Lung Association. (2024c). *Ozone*. https://www.lung.org/clean-air/outdoors/what-makes-air-unhealthy/ozone#how.

Arnold, S. R. Lombardozzi, D., Lamarque, J. F., Richardson, T., Emmons, L. K., Tilmes, S., Sitch, S. A., Folberth, G., Hollaway, M. J. and Val Martin, M. (2018). *Simulated Global Climate Response to Tropospheric Ozone-Induced Changes in Plant Transpiration.* Geophys Res Lett, 45 (23), 13070 – 13079. https://doi.org/10.1029/2018GL079938.

Aryal, B., Gurung, R., Camargo, A. F., Fongaro, G., Treichel, H., Mainali, B., Angove, M. J., Ngo, H. H., Guo, W. and Puadel, S. R. (2022). *Nitrous oxide emission in altitudes nitrogen cycle and implications for climate change*. Environmental Pollution, 314, 120272. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120272.

Aw, J. and Kleeman, M. J. (2003). *Evaluating the first-order effect of the intraannual temperature variability on urban air pollution*. J Geophys Res. Atmospheres. 108, D12, 4365. https://doi.org/10.1029/2002JD002688.

Bell, M. L., Peng, R. D. and Dominici, F. (2006). *The Exposure–Response Curve for Ozone and Risk of Mortality and the Adequacy of Current Ozone Regulations.* Environmental Health Perspectives, 114 (4). https://doi.org/10.1289/ehp.8816.

Benolol Garrido, M. (1996). *Análisis del Índice Metropolitano de la Calidad del Aire.* Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. https://repositorio.unam.mx/contenidos/analisis-del-indice-metropolitano-de-calidad-del-aire-imeca-305418?c=9Yk2Ro&d=true&q=*:*&i=1&v=1&t=search_0&as=0.

Bernard, S. M., Samet, J. M., Grambsch, A., Ebi, K. L. and Romieu, I. (2001). *The potential impacts of climate variability and change on air pollution-related health effects in the United States.* Environ Health Perspect, 109 (Suppl 2): 199 – 209. https://doi.org/10.1289/ehp.109-1240667.

Bloomer, B. J., Stehr, J. W., Piety, C. A., Salawitch, R. J., and Dickerson, R. R. (2009). *Observed relationships of ozone air pollution with temperature and emissions*. Geophys Res Lett, 36, L09803. https://doi.org/10.1029/2009GL037308.

Brimblecombe, P., Chu, M., Liu, C. H., Fu, Y., Wei, P. and Ning, Z. (2023). *Roadside NO_2/NOx and primary NO_2 from individual vehicles.* Atmospheric Environment, 295, 119562. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119562.

California Air Resources Board, (CARB). (2024a). *Carbon Monoxide & Health*. Arb.ca.gov. https://ww2.arb.ca.gov/es/resources/carbon-monoxide-and-health.

California Air Resources Board, (CARB). (2024b). *Inhalable Particle Matter and Health ($PM_{2.5}$ and PM_{10})*. Arb.ca.gov. https://ww2.arb.ca.gov/es/resources/inhalable-particulate-matter-and-health.

Carnelos, D. A., Jobbagy, E. and Piñeiro, G. (2024). *Rainout and washout contributions to wet atmospheric deposition in Southern South America.* Water, Air, & Soil Pollution, 235(3), 187. https://doi.org/10.1007/s11270-024-06991-z.

Carslaw, D. C. (2005). *Evidence of an increasing NO_2/NOx emissions ratio from road traffic emissions.* Atmospheric Environment, 26 (39). 4793 – 4802. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.06.023.

Carslaw, D. C. and Beevers, S. D. (2005). *Estimations of road vehicle primary NO_2 Exhaust emissions fractions using monitoring data in London.* Atmospheric Environment, 39 (1): 167 – 177. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.08.053.

Carslaw, D. C. (2019). *The openair manual open source tools for analyzing air pollution data*. University of York and Ricardo Energy & Environment. Version 12th. November 2019. https://davidcarslaw.com/files/openairmanual.pdf.

Chen, S. L., Chang, S. W., Chen, Y. J. and Chen, H. L. (2021). *Possible warming effect of fine particulate matter in the atmosphere*. Commun Earth Environ, 2, 208. https://doi.org/10.1038/s43247-021-00278-5.

Chen, C., Li, T., Sun, Q., Shi, W., He, M. Z., Wang, J., Liu, J., Zhang, M., Jiang, Q., Wang, M. and Shi, X. (2023). *Short-term exposure to ozone and cause-specific mortality risks and thresholds in China: Evidence from nationally representative data, 2013-2018.* Environment International, 171. https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107666.

Chen, X., Qi, L., Li, S. and Duan, X. (2024). *Long-term NO_2 exposure and mortality: A comprehensive meta-analysis.* Environ Pollut, 341. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122971.

Cheng, C.S., Campbell, M., Li, Q. Li, G., Auld, H., Day, N., Pengelly, D., Gingrich, S., and Yap, D. (2007). *A Synoptic Climatological Approach to Assess Climatic Impact on Air Quality in South-central Canada. Part II: Future Estimates*. Water Air Soil Pollut, 182, 117–130. https://doi.org/10.1007/s11270-006-9326-4.

Chong, J. J., Tsolakis, A., Gill, S. S., Theinnoi, K. and Golunski, S. E. (2010). *Enhancing the NO_2/NOx ratio in compression ignition engines by hydrogen and reformate combustion, for improved aftertreatment performance*. International Journal of Hydrogen Energy, 35 (16): 8723 – 8732. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.06.008.

Choomanee, P., Bualert, S., Thongyen, T., Rungratanaubon, T., Rattanapotanan, T. and Szymanski, W. W. (2024). *Beyond common urban air quality assessment: Relationship between $PM_{2.5}$ and black carbon during haze and non-haze periods in Bangkok.* Atmospheric Pollution Research, 15(2). https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101992.

Christensen, J.H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A. , Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R. K., Kwon, W.-T., Laprise, R., Magaña Rueda, V.., Mearns, L. . Menéndez, C.G., Räisänen, J., Rinke, A. Sarr, A. and Whetton, P. (2007). *2007: Regional Climate Projections*. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4_wg1_full_report-1.pdf.

Cooper, O. R., Parrish, D. D., Ziemke, J., Balashov, N. V., Cupeiro, M., Galbally, I. E., Gilge, S., Horowitz, L., Jensen, N. R., Lamarque, J. F., Naik, V., Oltmans, S. J., Schwab, J., Shindell, D. T., Thompson, A. M., Thouret, V., Wang, Y. and Zbinden, R. M. (2014). *Global distribution and trends of tropospheric ozone: An observation based review.* Elementa: Science of the Anthropocene, 2. https://doi.org/10.12952/journal.elementa.000029.

Collantes Jara, J. M. (2015). *Efectos de la radiación solar en la piel.* Rev Ecu Med Eugenio Espejo, 4 (5), 3 – 6. https://docs.bvsalud.org/biblioref/ecuador/2015/equ-7043/equ-7043-220.pdf.

Comisión Ambiental de la Megalópolis, (CAMe). (2022a). Se suspende la contingencia ambiental atmosférica por ozono en la Zona Metropolitana del valle de México. Comunicado 30 de marzo de 2022.

Comisión Ambiental de la Megalópolis, (CAMe). (2022b). Se suspende la contingencia ambiental atmosférica por ozono en la Zona Metropolitana del valle de México. Comunicado 4 de mayo de 2022.

Comisión Ambiental de la Megalópolis, (CAMe). (2022c). Se suspende la contingencia ambiental atmosférica por ozono en la Zona Metropolitana del valle de México. Comunicado 6 de mayo de 2022.

Comisión Ambiental de la Megalópolis, (CAMe). (2022d). Se suspende la contingencia ambiental atmosférica por ozono. Comunicado 21 de mayo de 2022 a las 18:00.

Comisión Ambiental de la Megalópolis, (CAMe). (2022e). Se suspende la contingencia ambiental atmosférica por ozono en la Zona Metropolitana del Valle de México. Comunicado 8 de junio de 2022.

Comisión Ambiental de la Megalópolis, (CAMe). (2022f). Continúa la Fase I de la contingencia ambiental atmosférica por ozono. Comunicado 13 de noviembre de 2022.

Comisión Ambiental de la Megalópolis, (CAMe). (2022g). Se suspende la contingencia ambiental atmosférica por ozono en la ZMVM. Comunicado 14 de noviembre de 2022.

Cromar, K., Gladson, L., Jaimes Palomera, M., & Perlmutt, L. (2021). *Development of a health-based index to identify the association between air pollution and health effects in* Mexico City. Atmosphere, 12(3), 372. https://doi.org/10.3390/atmos12030372.

de Foy, B., Krotkov, N. A., Bei, N., Herndon, S. C., Huey, L. G., Martínez, A.-P., Ruiz-Suárez, L. G., Wood, E. C., Zavala, M. and Molina, L. T. (2009). *Hit from both sides: tracking industrial and volcanic plumes in Mexico City with surface measurements and OMI SO_2 retrievals during the MILAGRO field campaign*. Atmos. Chem. Phys., 9, 9599–9617. https://doi.org/10.5194/acp-9-9599-2009.

Dey, S. and Dhal, G. C. (2019). *Materials progress in the control of CO and CO_2 emission at ambient conditions: An overview.* Materials Science for Energy Technologies, 2 (3), 607 – 623. https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.06.004.

Delle Monache, L., Nipen, T., Deng, X., Zhou, Y. and Stull, R. (2006). *Ozone ensemble forecasts: 2. A Kalman filter predictor bias correction*. Journal of Geophysical Research, Atmosphere, 111(D5). https://doi.org/10.1029/2005jd006311.

Dhir, B. (2016). *Air Pollutants and Photosynthetic Efficiency of Plants*. In: Kulshrestha, U. and Saxena, P., (Eds.). Plant Responses to Air Pollution. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1201-3_7.

D'Orazio, J., Jarrett, S., Amaro-Ortiz, A. and Scott, T. (2013). *UV radiation and the skin*. Int J Mol Sci, 14(6):12222-48. doi: 10.3390/ijms140612222.

Faïn, X., Etheridge, D., Fourteau, K., Martinerie, P., Trudinger, C. M., Rhodes, R. H., Chellman, N. J., Langenfelds, R. L., Mcconnell, J. R., Curran, M. A., Brook, E. J., Blunier, T., Teste, G., Grilli, R., Lemoine, A., Sturges, W. T., Vannière, B., Freitag, J. and Chappellaz, J. (2023). *Southern Hemisphere atmospheric history of carbon monoxide over the late Holocene reconstructed from multiple Antarctic ice archives*. Climate of the Past, 19, 2287 – 2311. https://doi.org/10.5194/cp-19-2287-2023.

Fann, N., Nolte, C. G., Dolwick, P., Spero, T. L., Brown, A. C., Phillips, S. and Anenberg, S. (2015). *The geographic distribution and economic value of climate change-related ozone health impacts in the United States in 2030.* Journal of the Air & Waste Management Association, 65 (5), 570 – 580. https://doi.org/10.1080/10962247.2014.996270.

Fiore, A. Jacob, D. J., Field, B. D., Streets, D. G., Fernandes, S. D. and Jang, C. (2002). *Linking ozone pollution and climate change: The case for controlling methane.* Geophysical Res Lett, 29 (19). https://doi.org/10.1029/2002GL015601.

Fry, M. M., Schwarzkopf, M. D., Adelman, V., Naik, V., Collins, J. and West, J. J. (2013). *Net radiative forcing and air quality responses to regional CO emission reductions.* Atmos Chem and Phys, 13 (10), 5381 – 5399. https://doi.org/10.5194/acp-13-5381-2013.

Gao, P., Wu. Y., He, L., Wang, L., Fu, Y., Chen, J., Zhang, F., Krafft, T. and Martens, P. (2023). *Adverse short-term effects of ozone on cardiovascular mortalities modified by season and temperature: a time-series study*. Front Public Health, 11: 1182337. https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1182337.

Gobierno de la Ciudad de México, (GOCDMX). (2019). Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 2019: *Aviso por el que se da a conocer el Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas en la Ciudad de México*. Vigésima primera época, No. 100 Bis. 28 de mayo de 2019, 3 22. https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/portal_old/uploads/gacetas/25a1ef7295458ade0faad3daebb31f05.pdf.

Godish, T. (1997). *Air Quality*. Lewis Publishers. CRC Press, LLC. 3rd edition.

Graber, J. M. and Smith, A. E. (2007). *Results from a State-Based Surveillance System for Carbon Monoxide*. Public Health Reports, 122 (2), 145 – 154. https://doi.org/10.1177/003335490712200203.

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático, (IPCC). (2021). *Cambio Climático 2013. Bases físicas. Resumen para responsables de políticas.* Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Matthews, R. , Berger, S., Huang, M., Yelekçi, O., Yu, R., Zhou, B., Lonnoy, E., Maycock, T. K., Waterfield, T., Leitzell, K., Caud, N. (Eds.). PNUMA. OMM. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_Spanish.pdf

Gutiérrez, A. M. (2017). *El Agua: Recurso natural de gran trascendencia para la vida*. 1.ª Ed. Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX). https://aplicaciones.sacmex.cdmx.gob.mx/libreria/biblioteca/libros/2018/aguaCDMX.pdf.

Hamra, G. B., Guha, N., Cohen, A., Laden, F., Raaschou-Nielsen, O., Samet, J. M., Vineis, P., Forastiere, F., Saldiva, P., Yorifuji, T. and Loomis, D. (2014). *Outdoor particulate matter Exposure and Lung Cancer: A Systematic Review and Meta-Analysis.* Environ Health Perspect, 122(9), 906-11. DOI: 10.1289/ehp/1408092.

Hartmann, D.L. (2016). *Global Physical Climatology*. Elsevier. 2nd Edition.

Honour, S. L., Bell, J. N., Ashenden, T. W., Cape, J. N. and Power, S. A. (2009). *Responses of herbaceous plants to urban air pollution: Effects on growth, phenology and leaf characteristics*. Environmental Pollution, 157(4), 1279–1286. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.11.049.

Huang, S., Li, H., Wang, M., Qian, Y., Steenland, K., Caudle, W.C., Liu, Y., Sarnat, J., Papatheodorou, S. and Shi, L. (2021). *Long-term exposure to nitrogen dioxide and mortality: A systematic review and meta-analysis.* Science of The Total Environment, 776, 145968. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145968.

Intergovernmental Panel on Climate Change, (IPCC-AR5). Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestvedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F. , Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T. and Zhang, H. (2013). *Anthropogenic and Natural Radiative Forcing*. In: Climate Change . The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.- K. , Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. and Midgley, P. M. (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 659 – 740. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.018.

Jacob, D. J. and Winner, D. A. (2003). *Effect of climate change on air quality*. Atmospheric Environment, 43 (1), 51 – 63. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.051.

Jacobson, M. (2012). Air Pollution and Global Warming: History, Science, and Solutions. Cambridge: Cambridge University Press.

Jáuregui, E. (1971). *Variaciones de largo periodo de los tipos de tiempo de superficie en México*. Investigaciones geográficas, 1(4), 7 - 22. https://doi.org/10.14350/rig.58858.

Khare, P., Machesky, J., Soto, R., He, M., Presto, A. A. and Gentner, D. R. (2020). *Asphalt-related emissions are a major missing nontraditional source of secondary organic aerosol precursors*. Sci Adv, 6 (36). DOI: 10.1126/sciadv.abb9785.

Lang, P. E., Carslaw, D. C. and Moller, S. J. (2019). A trend analysis approach for air quality network data. Atmospheric Environment, 2, 100030. https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100030.

Legge, A., Jäger, H. J. and Krupa, S., (1998). *Sulfur Dioxide*. In: Flager, R. B. (Ed.). Recognition of Air pollution Injury to Vegetation. A Pictorial Atlas. 2nd Edition. Air & Waste Management Association.

Lelieveld, J., Gromov, S., Pozzer, A. and Taraborrelli, D. (2016). *Global tropospheric hydroxyl distribution, budget and reactivity*. Atmos Chem Phys, 16 (19), 12477-12493. https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100030.

Li, J. H., Sun, S. Z., Tang, R., Qiu, H., Huang, Q. Y., Mason. T. G., and Tian, L. W. (2016). *Major air pollutants and risk of COPD exacerbations: a systematic review and meta-analysis*. Int J Chron Obstruct Pulmon Dis, 11 (1), 3079-3091. https://doi.org/10.2147/COPD.S122282.

Li, J., Carlson, B. E., Yung, Y. L., Lv, D., Hansen, J., Penner, J. E., Liao, H., Ramaswamy, V., Kahn, R. A., Zhang, P., Dubovik, O., Ding, A., Lacis, A. A., Zhang, L. and Dong, Y. (2022). *Scattering and absorbing aerosols in the climate system*. Nat Rev Earth Environ 3, 363–379. https://doi.org/10.1038/s43017-022-00296-7.

Liu, C., Chen, R., Sera, F. R., Vicedo-Cabrera, A. M., Guo, Y., Tong, S., Coelho, M. S. Z., Saldiva, P. H., Lavigne, E., Matus, P., Valdes-Ortega, N., Osornio-Garcia, S., Pascal, M., Stagoggia, M., Scortichini, M., Honda, Y., Hurtado-Díaz, M., Cruz, J., Nunes, B., Teixeira, J. P., Kim, H., Tobias, A., Íñiguez, C., Forsberg, B., Aström, C., Ragettli, M. S., Guo, Y. L., Chen, B. Y., Bell, M. L., Wright, C. Y., Scovronick, N., Garland, R. N., Milojevic, A., Kyselý, J., Urban, A., Orru, H., Indermitte, E., Jaakkola, J. J. K., Ryti, N. R. I., Katsouyanni, K., Analitis, A., Zanobetti, A., Schwartz, J., Chen, J., Wu, T., Cohen, A., Gasparrini, A. and Kan, H. (2019). *Ambient Particulate Air Pollution Daily Mortality in 652 Cities*. N Engl J Med, 381(8), 705 – 715. https://www.nejm.org/doi/full/10.1056/NEJMoa1817364.

Lyu, X., Li, K., Guo, H., Morawska, L., Zhou, B., Zeren, Y., Jiang, F., Chen, C., Goldstein, A. H., Xu, X., Wang, T., Lu, X., Zhu, T., Querol, X., Chatani, S., Latif, M. T., Schuch, D., Sinha, V., Kumar, P., Mullins, B., Seguel, R., Shao, M., Xue, L., Wang, N., Chen, J., Gao, Chai, F., Simpson, I., Sinha, B. and Blake, D. R. (2023). *A synergistic ozone-climate control to address emerging ozone pollution challenges*. One Earth, 6 (8), 964 – 977. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.07.004.

Marquès, M., Correig, E., Ibarretxe, D., Anoro, E., Arroyo J. A., Jericó, C., Borrallo, R. M., Miret, M., Näf, S., Pardo, A., Perea, V., Pérez-Bernalte, R., Ramírez-Montesinos, R., Royuela, M., Soler, C., Urquizu-Padilla, M., Zamora, A., Pedro-Botet, J.; STACOV-XULA research group; Masana, L. and Domingo, J. L. (2022). *Long-term exposure to PM_{10} above WHO guidelines exacerbates COVID-19 severity and mortality*. Environ Int, 158, 106930. https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106930.

McDonald, B. C., De Gouw, J. A., Gilman, J. B., Jathar, S. H., Akherati, A., Cappa, C. D., Jimenez, J. L., Lee-Taylor, J., Hayes, P. L., McKeen, S. A., Cui, Y. Y., Kim, S., Gentner, D. R., Isaacman-Vanwertz, G., Goldstein, A.H., Frost, G. J., Roberts, J. M., Ryerson, T. B. and Trainer, M. (2018). *Volatile chemical products emerging as large petrochemical source of urban organic emissions*. Science, 359 (6377), 760 – 764. DOI: 10.1126/science.aaq0524.

Mills, G., Buse, A., Gimeno, B., Bermejo, V., Holland, M., Emberson, L. and Pleijel, H. (2007). *A synthesis of AOT40-based response functions and critical levels of ozone for agricultural and horticultural crops.* Atmospheric Environment, 41 (12), 2630-2643. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.11.016.

Monks, P. S., Archibald, A. T., Colette, A., Cooper, O., Coyle, M., Derwent, R., Fowler, D., Granier, C., Law, K. S., Mills, G. E., Stevenson, D. S., Tarasova, O., Thouret, V., von Schneidemesser, E., Sommariva, R., Wild, O. and Williams, M. L. (2015). *Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer*. Atmos Chem Phys, 15, (15), 8889–8973. https://doi.org/10.5194/acp-15-8889-2015.

National Oceanic and Atmospheric Administration, (NOAA). (2023). *Annual 2022 Global Climate Report*. National Centers for Environmental Information. National Oceanic and Atmospheric Administration. https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202213.

Newell, K., Kartosanaki, C., Hubert-Lam, K. B. and Kurmi, O. P. (2017). *Cardiorespiratory health effects of particulate ambient air pollution exposure in low-income and middle-income countries: a systematic review and meta-analysis*. The Lancet Planet Health, 1(9), E368 – 80.

Nolte, C. G., Dolwick, P. D., Fann, N., Horowitz, L. W., Naik, V., Pinder, R. W., Spero, T. L., Winner, D. A. and Ziska, D. A.(2018). *Chapter 13: Air Quality*. In Impacts, Risks and Adaptation in the United States: Fourth National Climate Assessment. Volume II. Reidmiller, D. R., Avery, C. W., Easterling, D. R., Kunkel, K. E., Lewis, K. L. M., Maycock, T. K. and Stewart, B. C. (Eds.). U. S. Global Change Research Program. Washington. https://doi.org/10.7930/NCA4.2018.CH13.

Ocampo Cervantes, J. A. (2021, febrero). *Suelo de conservación de la Ciudad de México: Asuntos ambientales de la metrópoli*. Cauce. Boletín Informativo. Universidad Autónoma Metropolitana. Año 17/18.
https://cauce.xoc.uam.mx/wp-content/uploads/2020/06/Cauce_1_2021ARMADOok.pdf.

Orellano, P., Reynoso, J., Quaranta, N., Bardach, A. and Ciapponi, A. (2020). *Short-term exposure to particulate matter (PM_{10} and $PM_{2.5}$), nitrogen dioxide (NO_2), and ozone (O_3) and all-cause and cause-specific mortality: Systematic review and meta-analysis*. Environment International, 142, 105876. https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105876.

Organización Meteorológica Mundial, (OMM). (2023). *Organización Meteorológica Mundial, Boletín de la OMM sobre la calidad del aire y el Clima*. Boletín No 3, septiembre de 2023. https://library.wmo.int/records/item/68466-n-3-septiembre-de-2023?offset=68https://library.wmo.int/records/item/68466-n-3-septiembre-de-2023?offset=68.

Organización Mundial de la Salud, (OMS). (2003). *Índice UV Solar Mundial. Guía Práctica.* Documento WHO/SDE/OEH/02.2. Recomendación conjunta de Organización Mundial de la Salud, Organización Meteorológica Mundial, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Comisión Internacional de Protección contra la Radiación no Ionizante.
https://www.who.int/es/publications/i/item/9241590076.

Organización Mundial de la Salud, (OMS). (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Actualización mundial 2005*. https://www.paho.org/es/documentos/guias-calidad-aire-oms-relativas-al-material-particulado-ozono-dioxido-nitrogeno-dioxido.

Paoletti, E. (2009). *Ozone and urban forests in Italy*. Environmental Pollution, 157(5), 1506 – 1512. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.09.019.

Peel, J. L., Haeuber, R., Garcia, V. Russell, A. G. and Neas, L. (2013). *Impact of nitrogen and climate change interactions on ambient air pollution and human health*. Biogeochemistry 114, 121–134. https://doi.org/10.1007/s10533-012-9782-4.

Ramlall, C., Varghese, B., Ramdhani, S., Pammenter, N. W., Bhatt, A., Berjak, P. and Sershen, N. (2015). *Effects of simulated acid rain on germination, seedling growth and oxidative metabolism of recalcitrant-seeded Trichilia dregeana grown in its natural seed bank*. Physiologia Plantarum, 153(1), 149-160. https://doi.org/10.1111/ppl.12230.

Richmond-Bryant, J., Snyder, M. G., Owen, R. C. and Kimbrough, S. (2018). *Factors associated with NO_2 and NOx concentration gradients near a highway*. Atmospheric Environment, 174, 214 – 226. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.11.026.

Schikowski, T., Sugiri, D., Ranft, U. Gehring, U., Heinrich, J., Wichmann, H. E. and Krämer, U. (2005). *Long-term air pollution exposure and living close to busy roads are associated with COPD in women*. Respir Res, 6, 152. https://doi.org/10.1186/1465-9921-6-152.

Secretaría del Medio Ambiente, (SEDEMA). (2018). *Calidad del Aire en la Ciudad de México, Informe Anual 2017.* Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico.

Secretaría del Medio Ambiente, (SEDEMA). (2022). *Calidad del Aire en la Ciudad de México, Informe Anual 2019.* Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico.

Secretaría del Medio Ambiente, (SEDEMA). (2023a). *Calidad del Aire en la Ciudad de México, Informe Anual 2020.* Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico.

Secretaría del Medio Ambiente, (SEDEMA). (2023b). *Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2020.* Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Proyectos de Calidad del Aire.

Secretaría del Medio Ambiente, (SEDEMA). (2024). *Calidad del Aire en la Ciudad de México, Informe Anual 2021.* Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico.

Servicio Meteorológico Nacional, (SMN). (2022a). *Reporte del Clima en México: Reporte Mensual Mayo 2022*. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, año 12, núm. 5. Gerencia de Meteorología y Climatología. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/RC-Mayo22.pdf.

Servicio Meteorológico Nacional, (SMN). (2022b). *Reporte del Clima en México: Reporte Mensual Octubre 2022*. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, año 12, núm. 10. Gerencia de Meteorología y Climatología. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/RC-Octubre22.pdf.

Servicio Meteorológico Nacional, (SMN). (2023a). *Reporte del Clima en México: Reporte Mensual Diciembre 2022*. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, año 12, núm. 10. Gerencia de Meteorología y Climatología. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/RC-Diciembre22.pdf.

Servicio Meteorológico Nacional, (SMN). (2023b). *Reporte anual del clima en México 2022*. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, año 12, núm. 13. Gerencia de Meteorología y Climatología. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/Anual2022.pdf.

Shen, S., Li, X., Yuan, C., Huang, Q., Liu, D., Ma, S., Hui, J., Liu, R., Wu, T. and Chen, Q. (2020). *Association of short-term exposure to sulfur dioxide and hospitalization for ischemic and hemorrhagic stroke in Guangzhou, China*. BMC Public Health, 20, 263. https://doi.org/10.1186/s12889-020-8354-0.

Sivasakthivel, T. and Reddy, K. K. (2011). *Ozone Layer Depletion and Its Effects: A Review.* International Journal of Environmental Science and Development, 2 (1), 30 - 37. https://www.ijesd.org/show-29-343-1.html.

Song, J., Qiu, W., Huang X., Guo, Y., Chen, W., Wang, D. and Zhang, X. (2023). *Association of ambient carbon monoxide exposure with hospitalization risk for respiratory diseases: A time series study in Ganzhou, China.* Front Public Health, 11: 1106336. https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1106336.

Soto Coloballes, N.V. (2010). *Medio siglo de monitoreo de la contaminación atmosférica en la Ciudad de México 1960 – 2009. Aspectos científicos y sociales*. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. https://ru.dgdc.unam.mx/bitstream/handle/123456789/13/tesis77-medio.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Spracklen, D. V., Arnold, S. R. and Taylor, C. M. (2012). *Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests*. Nature, 489, 282-285. https://doi.org/10.1038/nature11390.

Stylianou, M. and Nicolich, M. J. (2009). *Cumulative effects and threshold levels in air pollution mortality: Data analysis of nine large US cities using the NMMAPS dataset*. Environmental Pollution, 157(8–9), 2216-2223. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.04.011.

Suddick, E. C., Whitney, P., Townsend, A. R. and Davidson, E. A. (2013). *The role of nitrogen in climate change and the impacts of nitrogen–climate interactions in the United States: foreword to thematic issue.* Biogeochemistry 114, 1–10. https://doi.org/10.1007/s10533-012-9795-z.

Thangavel. P., Park, D. and Lee, Y. C. (2022) *Recent Insights into Particulate Matter ($PM_{2.5}$)-Mediated Toxicity in Humans: An Overview*. Int J Environ Res. Public Health, 19 (12), 7511. https://doi.org/10.3390/ijerph19127511.

United Nations Environment Program, (UNEP). (2023). *Pollution Action Note – Data you need to know*. https://www.unep.org/interactives/air-pollution-note/.

United States Environmental Protection Agency, (U.S. EPA). (1993). *Air Quality Criteria for Ozone and Related Photochemical Oxidants.* Environmental Protection Agency, pp. 3–6 (EPA-600/P-93-004aF-cF).

United States Environmental Protection Agency, (U.S. EPA). (2019). *Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter* (Final Report, Dec 2019). Washington, DC, EPA/600/R-19/188, 2019. https://assessments.epa.gov/isa/document/&deid=347534.

United States Environmental Protection Agency, (U.S. EPA). (2023). *Particulate Matter (PM) Pollution: Health and Environmental Effects of Particulate Matter (PM).* https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm.

United States Environmental Protection Agency, (U.S. EPA). (2024a). *Nitrogen Dioxide (NO2) Pollution: Basic information about NO2*. https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2.

United States Environmental Protection Agency, (U.S. EPA). (2024b). *Carbon Monoxide (CO) Pollution in Outdoor Air: Basic information about Carbon Monoxide (CO) Outdoor Air Pollution.* https://www.epa.gov/co-pollution/basic-information-about-carbon-monoxide-co-outdoor-air-pollution.

United States Environmental Protection Agency, (U.S. EPA). (2024c). *Ground Level Ozone Pollution: Health effects of ozone pollution.* https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/health-effects-ozone-pollution.

United States Environmental Protection Agency, (U.S. EPA). (2024d). *Air Research: Air Quality and Climate Change Research*. https://www.epa.gov/air-research/air-quality-and-climate-change-research.

United States Environmental Protection Agency, (U.S. EPA). (2024e). *Climate Change Impacts: Climate Change Impacts on Air Quality*. https://www.epa.gov/climateimpacts/climate-change-impacts-air-quality.

United States Global Change Research Program, (USGCRP). (2016). *The Impacts of Climate Change on Human Health in the United States: A Scientific Assessment*. Crimmins, A., Balbus, J., Beard, C.B., Bell, J.E., Dodgen, D., Eisen, R.J., Fann, N., Hawkins, M.S., Herring, S.C., Jantarasami, L. Mills, D.M., Saha, S., Sarofim, M.C., Trtanj, J. and Ziska, L. (Eds). U.S. Global Change Research Program, Washington, DC. http://dx.doi.org/10.7930/J0R49NQX.

Valdés-Barron, M., Bonifaz-Alfonzo, R., Riveros-Rosas, D., Velasco-Herrera, V. and Estévez-Pérez, H. (2013). *UVB solar radiation climatology for Mexico.* Geofísica Internacional, 52 (1), 31 – 42. DOI: 10.1016/S0016-7169(13)71460-0.

van Eeden, S. F., Tan, W. C., Suwa, T., Mukae, H., Terashima, T., Fujii, T., Qui, D., Vincent, R. and Hogg, J. C. (2001). *Cytokines involved in the systemic inflammatory response induced by exposure to particulate matter air pollutants (PM_{10})*. Am J Respir Crit Care Med, 164(5), 826-30. https://doi.org/10.1164/ajrccm.164.5.2010160.

Vingarzan, R., (2004). *A review of surface ozone background levels and trends.* Atmospheric Environment 38, 3431–3442. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.03.030.

Volcano Active Foundation. (2017). *Cambio Climático: Los volcanes pueden afectar el clima*. https://volcanofoundation.org/es/creando-conocimiento-de-los-riesgos/peligros/cambio-climatico/.

Wang, L., Luo, D., Liu, X., Zhu, J., Wang, F., Li, B. and Li, L. (2021). *Effects of $PM_{2.5}$ exposure on reproductive system and its mechanisms*. Chemosphere, 264(Pt 1), 128436. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128436.

Wang, M., Li, H., Huang, S., Qian, Y., Steenland, K., Xie, Y., Papatheodorou, S. and Shi, L. (2022). *Short-term exposure to nitrogen dioxide and mortality: A systematic review and meta-analysis.* Environ Res, 202, 111766. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111766.

Wells, B., Dolwick, P., Eder, B., Evangelista, M., Foley, K., Mannshardt, E., Misenis, C. and Weishampel, A. (2021). *Improved estimation of trends in U.S. ozone concentrations adjusted for interannual variability in meteorological conditions*. Atmospheric Environment, 248, 118234. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118234.

Wise, E. K. and Comrie, A. C. (2005). *Meteorologically adjusted urban air quality trends in Southwestern United States*. Atmospheric Environment, 39 (16), 2969 – 2980. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.01.024.

World Health Organization, (WHO). (2021). *WHO global air quality guidelines: particulate matter ($PM_{2.5}$ and PM_{10}), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228.

Wu, W. and Zhang, Y. (2018). *Effects of particulate matter ($PM_{2.5}$) and associated acidity on ecosystem functioning: response of leaf litter breakdown*. Environ Sci Pollut Res, 25, 30720–30727. https://doi.org/10.1007/s11356-018-2922-1.

Yang, B., Zhang, K. M., Xu, W. D. , Zhang, S., Batterman, S., Baldauf, R. W., Deshmukh, P., Snow, R., Wu, Y., Zhang, Q., Li, Z. and Wu, X. (2018). *On-Road Chemical Transformation as an Important Mechanism of NO_2 Formation.* Environmental Science & Technology., 52 (8): 4574-4582. https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05648.

Yu, W., Xu, R., Ye, T., Abramson, M. J. Morawska, L., Jalaluding, B., Johnston, F. H., Henderson, S. B., Knibbs, L. D., Morgan, G. G., Lavigne, E., Heyworth, J., Hales, S., Marks, G. B., Woodward, A., Bell, M. L., Samet, J. M., Song, J., Li, S. and Guo, Y. (2024). *Estimates of global mortality burden associated with short-term exposure to fine particulate matter ($PM_{2.5}$)*. The Lancet Planetary Health, 8(3), E146 – E155. https://doi.org/10.1016/S2542-5196(24)00003-2.

Zhang, H. and Wang, Z. (2011). *Advances in the Study of Black Carbon Effects on Climate*. Advances in Climate Change Research, 2 (1), 23-30. https://doi.org/10.3724/SP.J.1248.2011.00023.

ANEXO 1

Sistema de Monitoreo Atmosférico de la CDMX

Sistema de Monitoreo Atmosférico de la CDMX

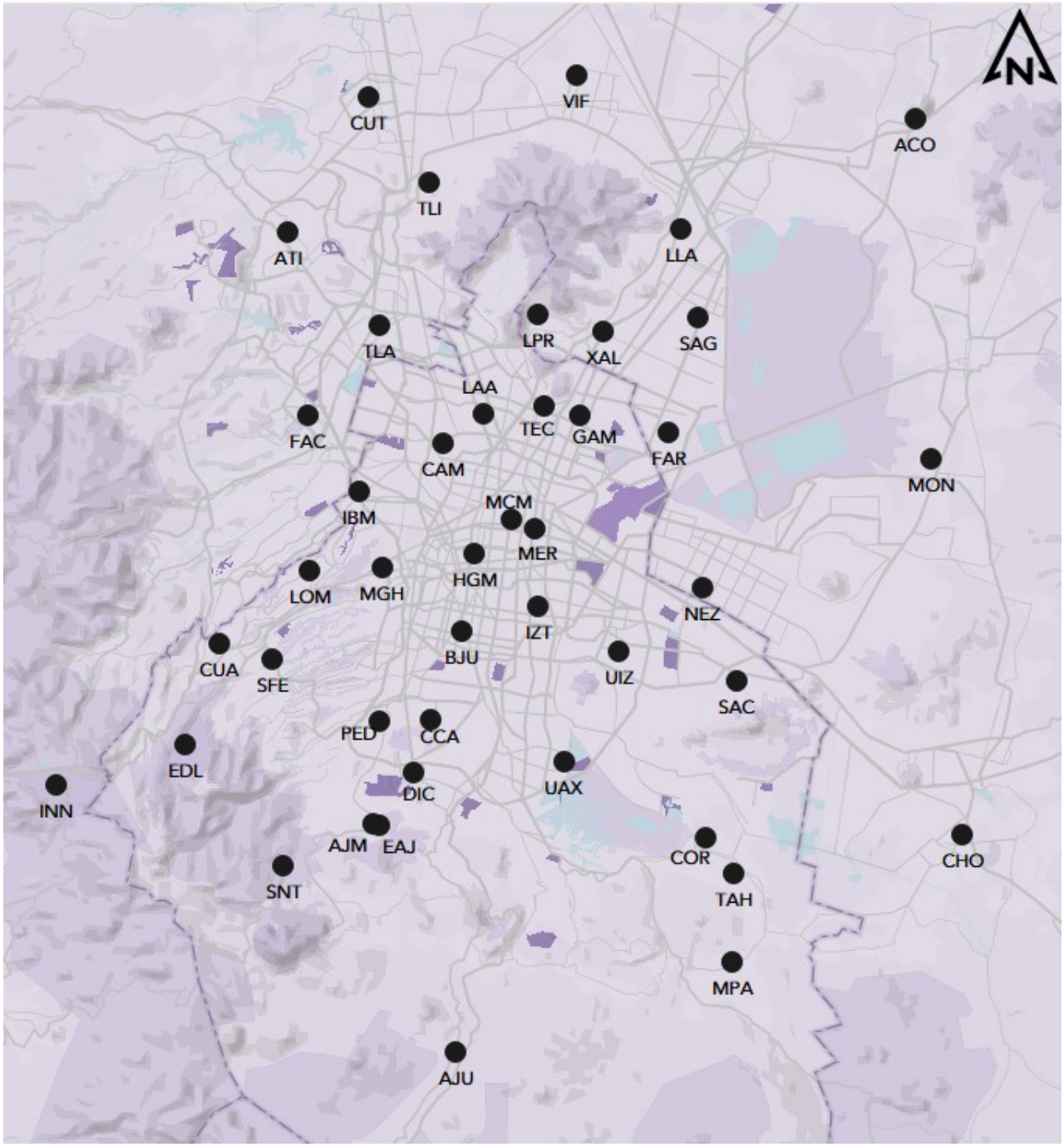


Figura A.I.1. Distribución de los sitios del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México

Red Automática de Monitoreo Atmosférico
(RAMA)

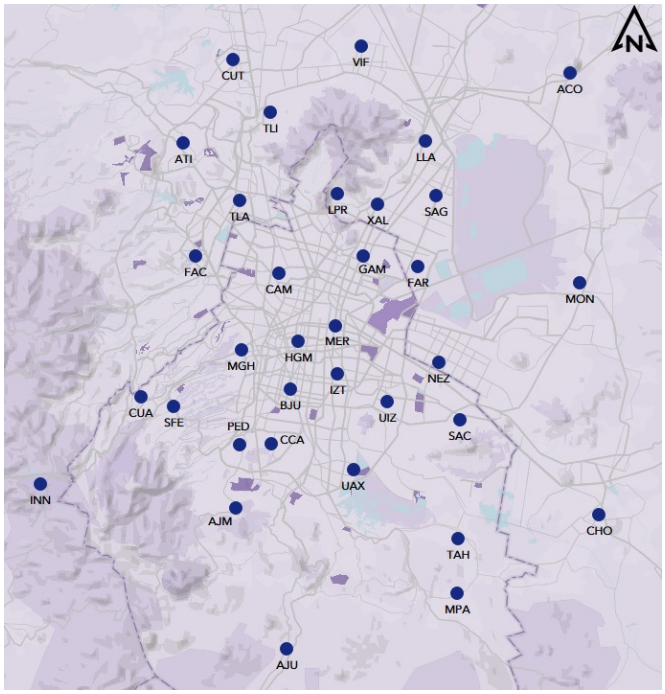


Figura A.I.2. Estaciones de la RAMA en operación durante 2021.

Red Manual de Monitoreo Atmosférico
(REDMA)

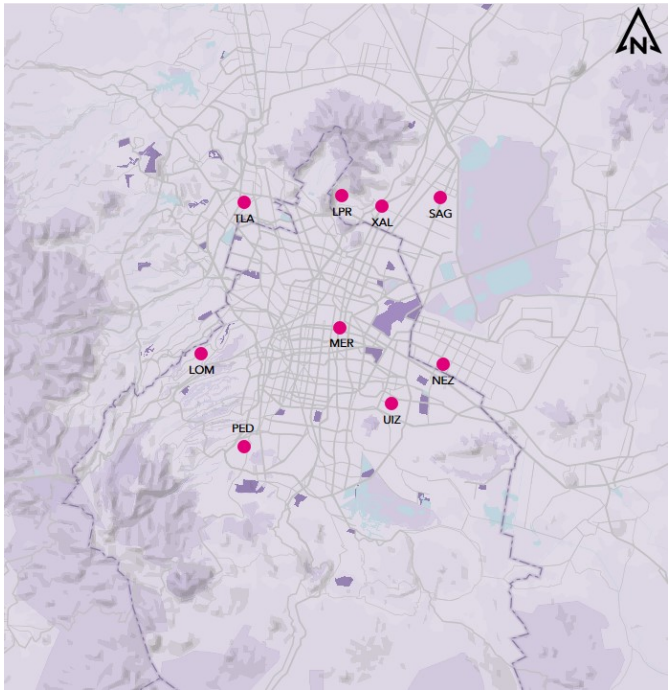


Figura A.I.3. Estaciones de la REDMA en operación durante 2021

Red de Meteorología y Radiación Solar
(REDMET)

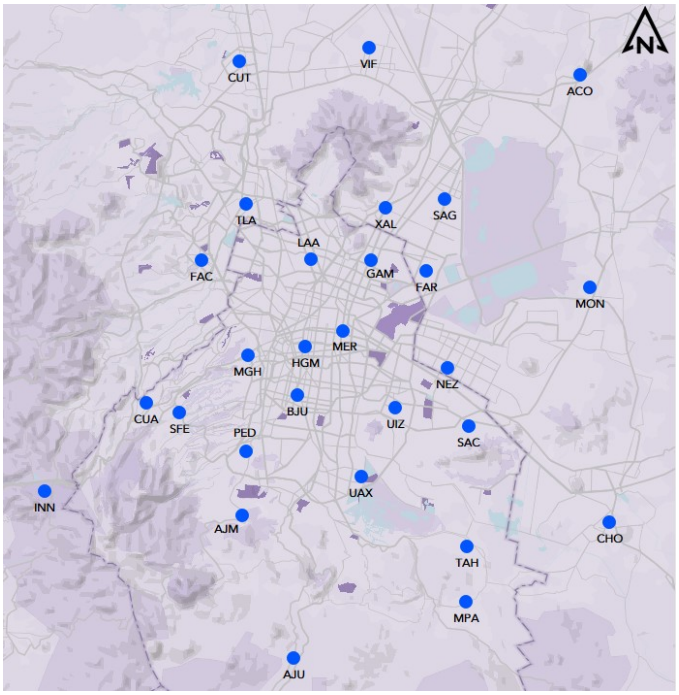


Figura A.I.4. Estaciones de la REDMET en operación durante 2021

Red de Depósito Atmosférico
(REDDA)

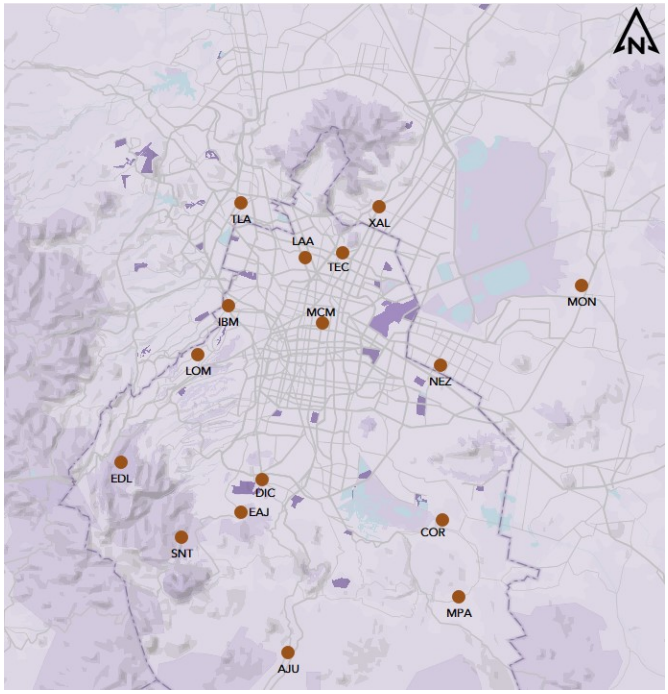


Figura A.I.5. Estaciones de la REDDA en operación durante 2021

Tabla A.I.1. Estaciones que integran la RAMA

					Parámetros								
Entidad	**Alcaldía o Municipio**	**Estación**	**Clave**	**Inicio operación**	**O_3**	**NOx**	**NO_2**	**NO**	**CO**	**SO_2**	**PM_{10}**	**$PM_{2.5}$**	**PM_{CO}**
Ciudad de México	Á. Obregón	Pedregal	PED	Ene–1986	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Azcapotzalco	Camarones	CAM	Ago–2003	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Benito Juárez	Benito Juárez	BJU	Ago–2015	■		■		■	■	■	■	■
	Coyoacán	CC Atmósfera	CCA	Ago–2014	■	■	■	■	■	■		■	
		UAM Xochimilco	UAX	Feb–2012	■	■	■	■	■	■		■	
	Cuajimalpa	Cuajimalpa	CUA	Nov–1993	■	■	■	■	■	■	■		
		Santa Fe	SFE	Feb–2012	■	■	■	■	■	■	■		■
	Cuauhtémoc	H. Gral México	HGM	Feb-2012	■	■	■	■	■	■	■	■	
	G. A. Madero	G. A. Madero	GAM	Dic–2015	■		■				■	■	
	Iztacalco	Iztacalco	IZT	Jul–2007	■	■	■	■	■	■	■		
	Iztapalapa	UAM Iztapalapa	UIZ	Ene–1986	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		S. Acahualtepec	SAC	Mar-2019	■		■	■	■	■		■	■
	Miguel Hidalgo	Miguel Hidalgo	MGH	Ene–2015	■	■	■	■	■	■			■
	Milpa Alta	Milpa Alta	MPA	Ene–2016	■				■	■			■
	Tlalpan	Ajusco	AJU	Ene–2015	■							■	
		Ajusco Medio	AJM	Ene–2015	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	V. Carranza	Merced	MER	Ene–1986	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Xochimilco	Tláhuac	TAH	Nov–1993	■	■	■	■	■	■	■		
Estado de México	Acolman	Acolman	ACO	Jul–2007		■	■	■		■	■		
	Atizapán	Atizapán	ATI	Nov–1993	■	■	■	■	■	■	■		
	Chalco	Chalco	CHO	Jul–2007									
	Coacalco	V. de las Flores	VIF	Nov–1993	■	■	■	■	■	■	■		
	Ecatepec	Los Laureles	LLA	Feb – 1986	■	■	■	■	■	■			
		San Agustín	SAG	Feb – 1986	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		Xalostoc	XAL	Ene – 1986									
	Naucalpan	FES Acatlán	FAC	Ene – 1986	■	■	■	■	■	■	■		
	Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	NEZ	Jul – 2011	■		■	■	■	■		■	■
		FES Aragón	FAR	Mar-2019	■				■	■		■	
	Ocoyoacac	I.I. Nucleares	INN	Ago – 2015	■				■	■	■	■	■
	Tepotzotlán	Cuautitlán	CUT	Feb – 2012	■	■	■	■		■	■		
	Texcoco	Montecillo	MON	Nov – 1993	■	■	■	■	■	■		■	■
	Tlalnepantla	La Presa	LPR	Ene – 1986	■				■	■			
		Tlalnepantla	TLA	Ene – 1986	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Tultitlán	Tultitlán	TLI	Nov – 1993	■	■	■	■	■	■			

Tabla A.I.2. Estaciones que integran la **REDMA**.

Entidad	Alcaldía o Municipio	Estación	Clave	Inicio operación	PST	PM10	PM2.5
Ciudad de México	Álvaro Obregón	Pedregal	PED	Ene – 1989		■	■
	Iztapalapa	UAM Iztapalapa	UIZ	Ene – 1989	■	■	■
	Miguel Hidalgo	Lomas	LOM	Ene – 1989		■	
	Venustiano Carranza	Merced	MER	Ene – 1989		■	■
Estado de México	Ecatepec	San Agustín	SAG	Ago – 2003			■
		Xalostoc	XAL	Ene – 1989	■	■	■
	Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	NEZ	Ene – 1989		■	
	Tlalnepantla	Tlalnepantla	TLA	Ene – 1989	■	■	■
		La Presa	LPR	Ene – 1989		■	

Tabla A.I.3. Estaciones que integran la **REDDA**.

Entidad	Alcaldía o Municipio	Estación	Clave	Inicio operación	P. pluvial	pH	H^+	CE	Aniones	Cationes
Ciudad de México	Cuajimalpa	Ex-Conv. Des. Leones	EDL	May - 1998	■	■	■	■	■	■
	Cuauhtémoc	Museo de la CDMX	MCM	Jun - 1989	■	■	■	■	■	■
	Gustavo A. Madero	Lab. Análisis Ambiental	LAA	Jun - 1995	■	■	■	■	■	■
		Cerro del Tepeyac	TEC	Ago - 1988						
	Magdalena Contreras	San Nicolás Totolapan	SNT	Ago - 1998	■	■	■	■	■	■
	Miguel Hidalgo	Legaria	IBM	Jun - 1989						
		Lomas	LOM	Jun - 1988						
	Milpa Alta	Milpa Alta	MPA	May - 1998						
	Tlalpan	Ajusco	AJU	May - 1998	■	■	■	■	■	■
		Diconsa	DIC	Jun - 1988						
		Ecoguardas Ajusco	EAJ	Jun - 1998	■	■	■	■	■	■
	Xochimilco	CORENA	COR	Jun - 1990	■	■	■	■	■	■
Estado de México	Ecatepec	Xalostoc	XAL	May - 1989						
	Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	NEZ	Jun - 1991						
	Texcoco	Montecillo	MON	Jun - 1994	■	■	■	■	■	■
	Tlalnepantla	Tlalnepantla	TLA	Jun - 1989	■	■	■	■	■	■

Tabla A.I.3. Estaciones que integran la **REDMET**

Entidad	Alcaldía o Municipio	Estación	Clave	Inicio operación	Parámetros							
					WSP	WDR	TMP	RH	RUV-A	RUV-B	RADG	PA
Ciudad de México	Álvaro Obregón	Pedregal	PED	Ene – 1986	■	■	■	■	■	■		
	Benito Juárez	Benito Juárez	BJU	Ago – 2015	■	■	■	■				
	Coyoacán	UAM Xochimilco	UAX	Feb - 2012	■	■	■	■				
	Cuajimalpa	Cuajimalpa	CUA	Jun – 2000	■	■	■	■				
	Cuajimalpa	Santa Fe	SFE	Feb – 2012	■	■	■	■	■	■	■	
	Cuauhtémoc	Hospital Gral. México	HGM	Feb – 2012	■	■	■	■				■
	Gustavo A. Madero	Gustavo A. Madero	GAM	Dic – 2015	■	■	■	■				
		Lab. Análisis Ambiental	LAA	Ene – 2016	■	■	■	■	■	■		■
	Iztapalapa	UAM Iztapalapa	UIZ	Abr – 2014	■	■	■	■			■	
		Stgo. Acahualtepec	SAC	Mar-- 2019	■	■						
	Miguel Hidalgo	Miguel Hidalgo	MGH	Feb – 2015	■	■	■	■			■	
	Milpa Alta	Milpa Alta	MPA	Ene – 2016	■	■	■	■				■
	Tlalpan	Ajusco	AJU	May – 2015	■	■	■					
		Ajusco Medio	AJM	Ene – 2015	■	■	■	■				■
	Venustiano Carranza	Merced	MER	Ene – 1986	■	■	■	■		■	■	■
	Xochimilco	Tláhuac	TAH	Jun – 2000	■	■	■	■				
Estado de México	Acolman	Acolman	ACO	Jul – 2011	■	■	■	■			■	
	Chalco	Chalco	CHO	Jul – 2011	■	■	■	■	■	■	■	
	Coacalco	Villa de las Flores	VIF	Jun – 2000	■	■	■	■				
	Ecatepec	San Agustín	SAG	Feb – 1986	■	■	■	■	■	■		
		Xalostoc	XAL	Ene – 1986	■	■	■	■			■	■
	Naucalpan	FES Acatlán	FAC	Ene – 1986	■	■	■	■	■	■		
	Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	NEZ	Jul – 2011	■	■	■	■				
		FES Aragón	FAR	Mar-- 2019	■	■	■	■				
	Ocoyoacac	Investigaciones Nucleares	INN	Sep – 2015	■	■	■	■				■
	Tepotzotlán	Cuautitlán	CUT	Feb – 2012	■	■	■	■	■	■	■	■
	Texcoco	Montecillo	MON	Jun – 2000	■	■	■	■	■	■	■	
	Tlalnepantla	Tlalnepantla	TLA	Ene – 1986	■	■	■	■			■	■

ANEXO 2

Operación del SIMAT

Tabla A.2.1. Períodos con falta de datos por mantenimiento u otra causa, durante 2022, en las estaciones de monitoreo de la RAMA y REDMET en la Ciudad de México

Alcaldía o Municipio	Estación	Clave	Red	Parámetros	Inicio	Hora	Fin	Hora	Motivo
Azcapotzalco	Camarones	CAM	RAMA	NO_2, NO, NOx, CO	03/01/22	01:00	09/02/22	01:00	Falla de comunicación
				O_3	03/01/22	01:00	11/02/22	01:00	Falla de comunicación
Coyoacán	Centro Ciencias Atmósfera	CCA	RAMA	$PM_{2.5}$	22/02/22	12:00	07/09/22	02:00	Adecuaciones del sitio
Cuajimalpa	Cuajimalpa	CUA	RAMA	NO_2, NO, NOx	01/01/22	24:00	20/01/22	01:00	Falla del equipo
				PM_{10}	28/07/22	11:00	08/09/22	02:00	Mantenimiento
			REDMET	RH	01/01/22	01:00	14/06/22	01:00	Falla de equipo
				TMP	01/01/22	01:00	08/09/22	01:00	Falla de equipo
				WDR, WSP	01/01/22	01:00	25/03/22	01:00	Falla de equipo
				WDR, WSP	13/06/22	01:00	08/09/22	01:00	Falla de equipo
	Santa Fe	SFE	RAMA	O_3, NO_2, NO, NOx, CO, SO_2, $PM_{2.5}$, PM_{10}	24/10/22	01:00	31/12/22	24:00	Falla energía
			REDMET	TMP, RH, WSP, WDR	22/04/22	01:00	31/12/22	24:00	Falla de sensores
Cuauhtémoc	Hospital Gral. México	HGM	RAMA	O_3, NO_2, NO, NOx, CO, SO_2, $PM_{2.5}$, PM_{10}, PM_{CO}	01/01/22	01:00	01/12/22	01:00	Hospital COVID
G. A. Madero	G. A. Madero	GAM	RAMA	$PM_{2.5}$, PM_{10}, PM_{CO}	01/01/22	01:00	02/10/22	02:00	Falla de equipo
Iztacalco	Iztacalco	IZT	RAMA	CO	03/01/22	01:00	13/02/22	01:00	Falla de comunicación
				O_3, NO_2, NO, NOx, SO_2, PM_{10},	03/01/22	01:00	08/02/22	17:00	Falla de comunicación
				O_3, NO_2, NO, NOx, CO, SO_2	29/10/22	11:00	21/12/22	01:00	Mantenimiento
				PM_{10}	25/07/22	02:00	21/12/22	02:00	Mantenimiento
M. Hidalgo	Miguel Hidalgo	MGH	RAMA	NO_2, NO, NOx, SO_2	12/10/22	01:00	01/11/22	01:00	Mantenimiento
Tlalpan	Ajusco	AJU	RAMA	O_3, PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_{CO}	30/07/22	13:00	10/11/22	01:00	Falla aire acondicionado
			REDMET	TMP, RH, WSP, WDR	27/09/22	14:00	09/11/22	13:00	Falla aire acondicionado
	Ajusco Medio	AJM	RAMA	O_3, NO_2, NO, NOx, CO, SO_2,	01/01/22	01:00	12/05/22	21:00	Falla de comunicación
				PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_{CO}	01/01/22	01:00	31/12/22	23:00	Mantenimiento
			REDMET	Pba	01/01/22	01:00	30/07/22	01:00	Falla del sensor
				TMP, RH	01/01/22	01:00	25/10/22	01:00	Falla del sensor
				WSP, WDR	11/07/22	01:00	30/07/22	01:00	Falla del sensor
				WSP, WDR	01/01/22	01:00	15/05/22	01:00	Falla de comunicación

Tabla A.2.1. (continuación) Períodos con falta de datos por mantenimiento, u otra causa, durante 2022, en las estaciones de monitoreo de la RAMA y REDMET en el Estado de México

Alcaldía o Municipio	Estación	Clave	Red	Parámetros	Inicio	Hora	Fin	Hora	Motivo
Acolman	Acolman	ACO	RAMA	CO	16/03/22	01:00	14/04/22	01:00	Mantenimiento
				O_3, NO_2, NO, NOx	16/03/22	10:00	13/04/22	10:00	Mantenimiento
					01/01/22	01:00	26/01/22	01:00	Mantenimiento
				SO_2	25/02/22	01:00	03/03/22	24:00	Registro sin continuidad
				PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_{CO}	16/03/22	12:00	13/04/22	11:00	Mantenimiento
			REDMET	TMP, RH	25/03/22	09:00	05/05/22	01:00	Falla sensor
				WSP, WDR	10/02/22	22:00	09/03/22	01:00	Falla sensor
				WSP, WDR	05/07/22	15:00	28/07/22	11:00	Falla sensor
Atizapán	Atizapán	ATI	RAMA	O_3, NO_2, NO, NOx, CO, SO_2, PM_{10}	03/01/22	01:00	0702/22	01:00	Falla sistema comunicación
Chalco	Chalco	CHO	RAMA	O_3, NO_2, NO, NOx, CO	16/02/22	12:00	24/03/22	01;00	Falla aire acondicionado
				PM_{10}	15/02/22	17:00	29/03/22	13:00	Falla aire acondicionado
				SO_2	01/08/22	01:00	19/09/22	17:00	Falla de equipo
			REDMET	TMP, RH	08/02/22	16;00	01/04/22	01:00	Falla sistema comunicación
				WSP, WDR	16/02/22	14:00	01/04/22	01:00	Falla sensor
				WSP, WDR	04/11/22	16:00	06/12/22	01:00	Falla sensor
				UVA, UVB	01/01/22	01:00	01/04/22	01:00	Falla sensor
Ecatepec	Los Laureles	LLA	RAMA	O_3	03/01/22	01:00	07/02/22	01:00	Falla sistema comunicación
	Xalostoc	XAL	RAMA	O_3, NO_2, NO, NOx, CO, SO_2, PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_{CO}	01/01/22	01:00	31/12/22	24:00	Hospital COVID
Naucalpan	FES Acatlán	FAC	REDMET	UVA, UVB	18/02/22	13:00	01/04/22	01:00	Mantenimiento
				TMP	01/07/22	18:00	15/10/22	01:00	Falla sensor
Nezahualcóyotl	FES Aragón	FAR	RAMA	$PM_{2.5}$	01/02/22	13:00	11/03/22	01:00	Falla de equipo
				SO_2	31/08/22	14:00	07/02/22	01:00	Falla de equipo
Ocoyoacac	Inst. Invest. Nucleares	INN	RAMA	O_3, CO, SO_2	13/10/22	10:00	10/11/22	01:00	Mantenimiento
				PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_{CO}	28/04/22	10:00	01/06/22	01:00	Mantenimiento
Tepotzotlán	Cuautitlán	CUT	RAMA	CO	01/01/22	01:00	18/10/22	04:00	Inicia operación 18/10/22
				O3, NO_2, NO, NOx, CO, SO_2, PM_{10}	22/07/22	01:00	13/08/22	04:00	Reubicación estación
			REDMET	TMP, HR, UVA, UVB	01/01/22	01:00	04/02/22	01:00	Falla del sensor
				RH, WSP, WDR	22/07/22	01:00	02/09/22	01:00	Reubicación de la estación
				UVA, UVB	22/07/22	01:00	01/09/22	01:00	Reubicación de la estación
				HR	22/07/22	01:00	14/09/22	01:00	Reubicación de la estación
Texcoco	Montecillo	MON	RAMA	NO_2, NO, NOx, CO, SO_2	26/01/22	12:00	21/02/22	01:00	Mantenimiento
				O_3	18/01/22	15:00	21/02/22	01:00	Mantenimiento
				CO	17/11/22	01:00	16/12/22	01:00	Falla de equipo

ANEXO 3

Estaciones reubicadas

ESTACIONES DE MONITOREO REUBICADAS

Durante este año la estación Cuautitlán (CUT) se reubicó debido al cierre del Parque Xochitla ocasionado por las restricciones durante la pandemia de COVID-19. Esta estación se cambió del municipio de Tepotzotlán a Cuautitlán Izcalli e reinició operaciones el 18 de octubre de 2022.

Tabla A.3.1. Datos generales de la estación CUT.

Municipio	Estación	Clave	No. Id.	Representatividad						Estatus
				O_3	CO	SO_2	NO_2	PM_{10}	$PM_{2.5}$	
Cuautitlán Izcalli, Estado de México	Cuautitlán	CUT	4841 5095 0109	4	3	4	4	4	P	Activa

Representatividad: 1.- Micro (hasta 100m) • 2.- Media (>100 m a 1km) • 3.- Vecinal (1 a 4km) • 4.- Urbana (de 4 a 20km) • 5.- Regional (>20km), P = Pendiente.

Tabla A.3.2. Ubicación CUT

Domicilio	Edificio	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)
Av. Boreal Esq. Selva S/N Col. Atlanta, CP 54740	Escuela Secundaria Técnica No 16, Lic. Adolfo López Mateos	19.646780	99.210240	2,271

Tabla A.3.3. Parámetros monitoreados en CUT

Subred	Parámetros que monitorea
RAMA	O_3, NOx, NO_2, NO, CO, SO_2, PM_{10}
REDMET	WS, WD, TMP, HR, RADG

Cuautitlán

Figura A.3.1. Estación Cuautitlán (CUT)

Estaciones de monitoreo sin acceso por estar en hospital COVID-19

El acceso en 2022 estuvo restringido en las estaciones **Hospital General de México** (HGM) y **Xalostoc** (XAL), por estar ubicadas en dos hospitales dedicados a la atención de la pandemia COVID-19.

Estaciones de monitoreo que dejaron de operar en 2022

La estación **Santa Fe** (SFE) dejó de operar a partir del 24 de octubre de 2022 por motivo de una falla en el sistema eléctrico de alimentación. La caseta y los analizadores aún se encuentran en el sitio original.

ANEXO 4

Estadísticas básicas del SIMAT

Tabla A.4.1. Estadísticas básicas para **dióxido de azufre (SO_2) en la CDMX y EDOMEX**, las unidades son ppb. Para la evaluación de la NOM se utilizaron las estaciones que cumplen los criterios de suficiencia de datos para el indicador de 1h y con los requerimientos del apartado A.1.2.2 para el valor límite de 24h de la NOM-022-SSA1-2019.

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	Trimestres con > 75% de datos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLIMIENTO NOM		
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Máximo promedio 24h (40 ppb)	Máximo promedio 1 h (75 ppb)	Cumple
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	54	1	25	2	0	2	1	1	1	1	2	4	14	30	SS
	Benito Juárez	BJU	94	4	55	3	0	4	2	1	1	2	3	6	25	53	Sí
	Camarones	CAM	74	2	75	3	0	5	2	1	1	2	3	7	33	76	SS
	Centro C. Atmósfera	CCA	92	4	36	2	0	3	1	1	1	1	2	4	19	43	Sí
	Cuajimalpa	CUA	94	4	41	2	0	3	2	1	1	1	3	5	19	34	SS
	Hospital Gral. México	HGM	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	19	54	NA
	Iztacalco	IZT	71	2	53	3	0	4	1	1	1	1	2	5	22	44	SS
	Merced	MER	94	4	71	3	0	5	2	1	1	2	3	6	29	55	Sí
	Miguel Hidalgo	MGH	88	3	72	3	0	4	2	1	1	2	3	6	24	52	Sí
	Milpa Alta	MPA	70	2	22	1	0	1	0	1	1	1	1	2	11	30	SS
	Pedregal	PED	88	3	35	2	0	3	1	1	1	1	2	4	17	36	Sí
	Santiago Acahualtepec	SAC	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	28	63	SS
	Santa Fe	SFE	72	3	42	2	0	3	1	1	1	1	2	4	17	34	No
	Tláhuac	TAH	81	3	25	1	0	1	1	1	1	1	2	3	10	25	No
	UAM Xochimilco	UAX	85	3	52	2	0	2	1	1	1	1	2	3	16	30	Sí
	UAM Iztapalapa	UIZ	87	3	52	2	0	3	1	1	1	2	2	4	19	47	Sí
Estado de México	Acolman	ACO	63	3	30	1	0	2	0	0	1	1	1	2	10	30	SS
	Atizapán	ATI	85	3	74	3	0	5	2	1	1	2	3	8	25	65	SS
	Chalco	CHO	56	2	28	1	0	1	0	0	1	1	1	2	5	19	SS
	Cuautitlán	CUT	88	3	87	4	0	6	3	1	1	2	4	8	28	82	No
	FES Acatlán	FAC	90	4	94	3	0	5	3	1	1	2	4	7	26	69	Sí
	FES Aragón	FAR	88	3	42	2	0	3	1	0	1	1	2	4	23	45	Sí
	Instituto Invest. Nucleares	INN	88	3	21	1	0	1	0	1	1	1	1	2	7	17	Sí
	Los Laureles	LLA	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	19	55	SS
	La Presa	LPR	87	4	34	2	0	3	2	1	1	2	3	5	19	NA	SS
	Montecillo	MON	79	2	63	2	0	2	1	1	1	1	2	3	7	23	SS
	Nezahualcóyotl	NEZ	86	3	66	2	0	4	2	1	1	1	3	5	27	59	Sí
	San Agustín	SAG	72	3	72	3	0	4	1	1	1	2	2	5	35	63	SS
	Tlalnepantla	TLA	87	3	125	5	0	7	3	1	2	3	5	11	43	89	No
	Tultitlán	TLI	52	2	112	5	0	9	4	1	1	2	5	11	36	102	SS
	Villa de las Flores	VIF	93	4	150	4	0	9	3	1	1	2	4	9	37	99	No
	Xalostoc	XAL	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	SS

SS: Sin suficiencia establecida en su NOM**; NA:** No aplica

Tabla A.4.2. Estadísticas básicas para **dióxido de nitrógeno (NO_2) en la CDMX y EDOMEX**, las unidades son ppb. Para la evaluación de la NOM se usaron las estaciones que cumplen los criterios de suficiencia de datos establecidos en la NOM-023-SSA1-2021.

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	Trimestres válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLIMIENTO NOM		
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Máximo horario (106 ppb)	Promedio anual (21 ppb)	Cumple
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	25	1	59	19	2	8	11	9	13	18	24	30	59	19	SS
	Ajusco	AJU	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	SS
	Benito Juárez	BJU	96	4	112	24	3	12	17	10	14	22	31	40	112	24	No
	Camarones	CAM	73	1	131	28	4	13	17	13	18	25	35	45	131	28	SS
	Centro C. Atmósfera	CCA	93	4	85	21	3	10	14	9	13	19	27	35	85	21	Sí
	Cuajimalpa	CUA	89	4	89	18	3	10	13	7	10	15	23	32	89	18	Sí
	Gustavo A. Madero	GAM	94	4	87	23	3	13	20	8	12	21	32	42	87	23	No
	Hospital Gral. México	HGM	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Iztacalco	IZT	73	2	92	26	4	12	16	13	17	24	33	42	92	26	SS
	Merced	MER	91	4	109	30	3	13	17	15	20	28	37	48	109	30	No
	Miguel Hidalgo	MGH	91	4	96	27	5	12	17	13	17	24	34	43	96	27	No
	Milpa Alta	MPA	66	1	37	7	0	5	6	2	3	5	9	14	37	7	SS
	Pedregal	PED	80	2	82	19	2	11	14	8	11	17	25	34	82	19	Sí
	Santiago Acahualtepec	SAC	86	4	102	21	2	12	16	8	12	19	28	38	102	21	No
	Santa Fe	SFE	73	3	67	18	3	9	11	8	11	16	22	29	67	18	SS
	Tláhuac	TAH	84	3	59	16	1	8	11	6	10	15	21	27	59	16	Sí
	UAM Xochimilco	UAX	86	3	77	21	3	10	14	9	13	20	27	34	77	21	Sí
	UAM Iztapalapa	UIZ	89	3	93	26	1	12	17	11	16	24	33	42	93	26	No
Estado de México	Acolman	ACO	79	3	67	14	1	8	11	5	8	13	19	25	67	14	Sí
	Atizapán	ATI	85	3	89	19	1	11	13	8	11	17	24	34	89	19	Sí
	Chalco	CHO	76	3	73	20	3	9	13	9	12	18	25	32	73	20	Sí
	Cuautitlán	CUT	84	3	119	20	2	12	15	8	11	18	26	35	119	20	No
	FES Acatlán	FAC	89	4	108	23	2	13	16	9	13	20	29	40	108	23	No
	FES Aragón	FAR	94	4	82	19	2	11	17	6	9	17	26	34	82	19	Sí
	Instituto Invest. Nucleares	INN	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	SS
	Los Laureles	LLA	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	SS
	La Presa	LPR	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	SS
	Montecillo	MON	77	2	52	14	1	9	13	4	7	13	20	28	52	14	Sí
	Nezahualcóyotl	NEZ	89	3	81	23	1	12	17	9	13	20	30	39	81	23	No
	San Agustín	SAG	93	4	75	22	3	11	16	9	13	20	29	37	75	22	No
	Tlalnepantla	TLA	89	3	102	28	6	12	15	14	19	26	34	44	102	28	No
	Tultitlán	TLI	53	2	97	23	3	13	20	8	12	21	32	40	97	23	SS
	Villa de las Flores	VIF	87	3	83	18	1	12	18	5	8	15	26	34	83	18	Sí
	Xalostoc	XAL	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	SS

SS: Sin suficiencia establecida en su NOM**; NA:** No aplica

Tabla A.4.3. Estadísticas básicas para **monóxido de carbono (CO) en la CDMX y EDOMEX**, las unidades son ppm. Para la evaluación de la NOM se usaron las estaciones que cumplen los criterios de suficiencia de datos establecidos en la NOM-021-SSA1-2021.

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLIMIENTO NOM			
				Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Máximo horario (26 ppm)	Máximo promedio 8 h (9 ppm)	Cumple 1 h	Cumple 8 h
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	33	1.6	0.4	0	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.6	1.3	SS	SS
	Benito Juárez	BJU	96	2.5	0.4	0	0.3	0.4	0.1	0.2	0.3	0.6	0.9	2.5	1.8	Sí	Sí
	Camarones	CAM	70	3.2	0.4	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.3	0.6	1.0	3.2	1.7	SS	SS
	Centro C. Atmósfera	CCA	93	1.8	0.3	0	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.8	1.1	Sí	Sí
	Cuajimalpa	CUA	94	2.1	0.3	0	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	2.1	1.1	Sí	Sí
	Hospital Gral. México	HGM	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	SS	SS
	Iztacalco	IZT	72	2.7	0.5	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.4	0.7	1.0	2.7	1.5	SS	SS
	Merced	MER	94	3.1	0.5	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.4	0.7	1.0	3.1	1.7	Sí	Sí
	Miguel Hidalgo	MGH	93	2.5	0.4	0	0.3	0.4	0.1	0.2	0.3	0.6	0.9	2.5	1.6	Sí	Sí
	Milpa Alta	MPA	50	1.0	0.2	0	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	1.0	0.7	SS	SS
	Pedregal	PED	80	1.7	0.3	0	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	1.7	1.1	Sí	Sí
	Santiago Acahualtepec	SAC	86	4.5	0.5	0	0.5	0.4	0.1	0.2	0.3	0.6	1.0	4.5	2.4	Sí	Sí
	Santa Fe	SFE	63	1.5	0.3	0	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.4	0.5	1.5	1.0	SS	SS
	Tláhuac	TAH	71	2.2	0.3	0	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	2.2	1.4	SS	SS
	UAM Xochimilco	UAX	86	2.8	0.3	0	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	2.8	1.7	Sí	Sí
	UAM Iztapalapa	UIZ	89	3.7	0.4	0	0.3	0.4	0.1	0.2	0.3	0.6	0.9	3.7	1.5	Sí	Sí
Estado de México	Acolman	ACO	79	1.7	0.2	0	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	1.7	1.1	Sí	Sí
	Atizapán	ATI	85	4.1	0.4	0	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.4	0.7	4.1	1.6	Sí	Sí
	Chalco	CHO	76	4.4	0.5	0	0.4	0.4	0.1	0.3	0.4	0.6	1.0	4.4	2.2	Sí	Sí
	Cuautitlán	CUT	20	2.7	0.5	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.4	0.6	0.9	2.7	1.7	SS	SS
	FES Acatlán	FAC	90	3.5	0.5	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	3.5	2.3	Sí	Sí
	FES Aragón	FAR	89	2.1	0.3	0	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	2.1	1.3	Sí	Sí
	Instituto. Invest. Nucleares	INN	87	1.3	0.2	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	1.3	0.7	Sí	Sí
	Los Laureles	LLA	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	SS	SS
	La Presa	LPR	90	4.3	0.6	0	0.5	0.5	0.2	0.3	0.5	0.8	1.2	4.3	2.4	Sí	Sí
	Montecillo	MON	75	3.4	0.4	0	0.4	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	3.4	1.4	Sí	Sí
	Nezahualcóyotl	NEZ	86	4.0	0.5	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.4	0.6	0.9	4.0	2.1	Sí	Sí
	San Agustín	SAG	93	2.9	0.4	0	0.3	0.4	0.1	0.2	0.3	0.6	0.9	2.9	1.6	Sí	Sí
	Tlalnepantla	TLA	71	2.8	0.5	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.4	0.6	1.0	2.8	1.5	SS	SS
	Tultitlán	TLI	43	3.1	0.4	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.3	0.5	0.9	3.1	2.5	SS	SS
	Villa de las Flores	VIF	93	3.2	0.4	0	0.4	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	3.2	2.5	Sí	Sí
	Xalostoc	XAL	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	SS	SS

SS: Sin suficiencia establecida en su NOM; **NA**: No aplica

Tabla A.4.4. Estadísticas básicas para **ozono (O_3) en la CDMX y EDOMEX**, las unidades son ppb. Para la evaluación de la NOM se usaron las estaciones que cumplen los criterios de suficiencia de datos establecidos en la NOM-020-SSA1-2021.

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	Trimestres válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLIMIENTO NOM				
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Máximo promedio 8h (65 ppb)	Máximo horario (90 ppb)	Núm. de horas >90 ppb (1h)	Cumplimiento 8h	Cumplimiento 1 h
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	53	1	163	41	1	27	33	14	21	34	54	82	134	163	320	SS	SS
	Ajusco	AJU	59	1	144	39	2	27	41	8	16	33	57	78	119	144	269	SS	SS
	Benito Juárez	BJU	87	3	169	33	0	30	42	2	8	23	50	79	128	169	452	No	No
	Camarones	CAM	75	2	146	26	0	27	35	1	5	17	40	67	116	146	200	No	No
	Centro C. Atmósfera	CCA	95	4	169	35	0	31	43	3	10	26	53	83	137	169	598	No	No
	Cuajimalpa	CUA	93	4	170	36	0	25	32	9	17	31	49	71	140	170	296	No	No
	Gustavo A. Madero	GAM	94	4	138	29	0	26	39	2	6	22	45	69	102	138	195	No	No
	Hospital Gral. México	HGM	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	SS	SS
	Iztacalco	IZT	72	2	157	30	0	29	39	2	7	21	46	75	120	157	280	SS	SS
	Merced	MER	90	4	156	27	0	27	36	2	5	17	41	69	118	156	247	No	No
	Miguel Hidalgo	MGH	95	4	152	29	0	28	36	2	7	20	43	72	119	152	311	No	No
	Milpa Alta	MPA	71	1	134	48	5	23	32	20	30	43	62	82	120	134	370	SS	SS
	Pedregal	PED	74	3	166	34	0	28	37	5	13	26	50	76	121	166	391	No	No
	Santiago Acahualtepec	SAC	84	3	148	33	0	27	38	3	10	26	48	72	119	148	253	No	No
	Santa Fe	SFE	71	3	172	38	0	29	36	7	17	31	53	82	145	172	413	SS	SS
	Tláhuac	TAH	86	4	136	33	0	25	36	6	13	26	49	70	112	136	201	No	No
	UAM Xochimilco	UAX	86	3	154	35	0	30	44	3	10	27	54	80	117	154	450	No	No
	UAM Iztapalapa	UIZ	88	3	155	31	0	29	42	2	7	22	49	74	124	155	311	No	No
Estado de México	Acolman	ACO	78	3	112	29	0	23	35	2	9	24	44	63	93	112	55	No	No
	Atizapán	ATI	86	3	139	29	0	24	32	3	10	22	42	66	112	139	159	No	No
	Chalco	CHO	77	3	122	29	0	25	38	2	8	25	46	66	99	122	83	No	No
	Cuautitlán	CUT	88	3	144	27	0	26	37	1	6	19	43	66	104	144	153	No	No
	FES Acatlán	FAC	90	4	146	26	0	23	29	2	9	20	38	61	104	146	102	No	No
	FES Aragón	FAR	93	4	145	31	0	26	38	2	9	25	47	71	105	145	182	No	No
	Instituto. Invest. Nucleares	INN	88	3	119	29	1	15	18	13	18	26	36	49	84	119	12	No	No
	Los Laureles	LLA	87	3	129	25	0	23	34	2	6	18	40	62	93	129	84	No	No
	La Presa	LPR	91	4	141	26	0	23	32	2	7	21	39	60	101	141	101	No	No
	Montecillo	MON	78	2	119	31	0	26	44	2	6	27	50	71	105	119	133	No	No
	Nezahualcóyotl	NEZ	89	3	143	32	0	27	41	2	9	25	50	73	112	143	274	No	No
	San Agustín	SAG	95	4	134	26	0	23	32	1	7	20	39	62	100	134	104	No	No
	Tlalnepantla	TLA	87	3	145	27	0	25	34	2	7	19	41	65	110	145	163	No	No
	Tultitlán	TLI	52	2	134	31	0	26	41	2	8	25	49	71	99	134	110	SS	SS
	Villa de las Flores	VIF	92	4	138	30	0	25	37	2	9	24	46	67	106	138	143	No	No
	Xalostoc	XAL	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	SS	SS

SS: Sin suficiencia establecida en su NOM; **NA**: No aplica

Tabla A.4.5. Estadísticas básicas para **óxidos de nitrógeno (NOx) en la CDMX y EDOMEX**, las unidades son ppb.

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	Trimestres válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	25	1	88	23	2	12	15	10	14	21	29	39
	Ajusco	AJU	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Benito Juárez	BJU	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Camarones	CAM	73	1	431	46	5	41	35	15	21	32	56	93
	Centro C. Atmósfera	CCA	93	4	180	28	2	22	22	10	14	22	36	56
	Cuajimalpa	CUA	89	4	198	24	3	20	17	8	12	18	29	46
	Hospital Gral. México	HGM	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Iztacalco	IZT	73	2	236	38	5	28	28	15	20	29	48	76
	Merced	MER	91	4	357	51	4	40	39	18	25	38	64	103
	Miguel Hidalgo	MGH	91	4	399	47	5	43	34	16	21	31	55	97
	Milpa Alta	MPA	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Pedregal	PED	80	2	133	24	2	18	18	8	12	19	30	47
	Santiago Acahualtepec	SAC	86	4	350	33	2	33	26	9	13	22	39	71
	Santa Fe	SFE	73	3	159	24	4	18	16	9	13	19	29	47
	Tláhuac	TAH	84	3	145	21	1	15	16	7	11	17	27	39
	UAM Xochimilco	UAX	86	3	260	30	3	26	25	9	13	22	38	60
	UAM Iztapalapa	UIZ	89	3	317	38	2	29	30	13	18	29	48	73
Estado de México	Acolman	ACO	79	3	170	21	1	18	19	6	9	15	28	46
	Atizapán	ATI	85	3	209	28	1	25	20	9	12	19	32	58
	Chalco	CHO	76	3	435	37	2	37	28	11	15	24	43	79
	Cuautitlán	CUT	84	3	356	36	2	39	30	9	13	23	43	82
	FES Acatlán	FAC	89	4	338	39	3	38	30	11	16	26	46	89
	FES Aragón	FAR	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Instituto Invest. Nucleares	INN	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Los Laureles	LLA	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	La Presa	LPR	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Montecillo	MON	77	2	413	29	1	37	26	4	8	15	34	70
	Nezahualcóyotl	NEZ	89	3	293	33	2	29	26	11	15	24	41	66
	San Agustín	SAG	93	4	255	36	4	32	29	11	16	25	45	75
	Tlalnepantla	TLA	89	3	298	47	7	37	32	18	24	35	56	93
	Tultitlán	TLI	53	2	333	38	4	37	32	9	14	24	46	84
	Villa de las Flores	VIF	87	3	259	30	2	32	28	6	10	18	38	70
	Xalostoc	XAL	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

NA: No aplica

Tabla A.4.6. Estadísticas básicas para **óxido nítrico (NO) en la CDMX y EDOMEX**, las unidades son ppb

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	Trimestres válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	25	1	53	5	0	6	4	1	1	2	5	11
	Ajusco	AJU	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Benito Juárez	BJU	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Camarones	CAM	73	1	386	18	0	33	16	1	2	5	18	52
	Centro C. Atmósfera	CCA	93	4	150	8	0	15	6	0	1	2	7	22
	Cuajimalpa	CUA	89	4	157	7	0	13	5	0	1	2	6	15
	Hospital Gral. México	HGM	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Iztacalco	IZT	73	2	190	12	0	20	10	1	2	4	12	35
	Merced	MER	91	4	295	21	0	32	22	1	3	8	25	59
	Miguel Hidalgo	MGH	91	4	350	20	0	36	16	2	3	6	19	56
	Milpa Alta	MPA	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Pedregal	PED	80	2	105	5	0	10	3	1	1	1	4	14
	Santiago Acahualtepec	SAC	86	4	286	12	0	24	9	1	1	3	10	33
	Santa Fe	SFE	73	3	128	7	0	12	5	1	1	2	6	17
	Tláhuac	TAH	84	3	114	5	0	10	4	0	1	2	5	13
	UAM Xochimilco	UAX	86	3	230	9	0	20	8	0	1	1	9	28
	UAM Iztapalapa	UIZ	89	3	275	12	0	21	12	1	1	3	13	34
Estado de México	Acolman	ACO	79	3	146	7	0	12	6	0	1	2	7	22
	Atizapán	ATI	85	3	167	8	0	17	5	0	1	2	6	24
	Chalco	CHO	76	3	396	17	0	32	13	1	2	5	15	50
	Cuautitlán	CUT	84	3	323	16	0	33	12	1	1	4	13	48
	FES Acatlán	FAC	89	4	303	17	0	30	14	1	2	5	16	49
	FES Aragón	FAR	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Instituto. Invest. Nucleares	INN	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Los Laureles	LLA	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	La Presa	LPR	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Montecillo	MON	77	2	384	14	0	32	10	0	0	1	10	46
	Nezahualcóyotl	NEZ	89	3	249	11	0	22	9	0	1	3	10	30
	San Agustín	SAG	93	4	223	14	0	25	11	1	2	4	13	42
	Tlalnepantla	TLA	89	3	257	20	0	30	17	2	4	9	21	51
	Tultitlán	TLI	53	2	273	15	0	28	12	1	1	3	13	46
	Villa de las Flores	VIF	87	3	225	12	0	24	9	1	1	3	10	37
	Xalostoc	XAL	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

NA: No aplica

Tabla A.4.7. Estadísticas básicas para **muestreo manual de partículas suspendidas totales (PST)**, las unidades de concentración son µg/m³ calculadas a las condiciones locales de presión y temperatura.

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
				Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	UAM Iztapalapa	UIZ	98	168	80	31	30	39	46	58	77	97	119
Estado de México	Tlalnepantla	TLA	97	200	89	41	32	42	53	63	87	105	128
	Xalostoc	XAL	49	182	93	39	32	42	57	70	90	111	130

Tabla A.4.8. Estadísticas básicas para **PM_{10}** del **monitoreo manual**, método de referencia (FRM de U.S. EPA). Las unidades son µg/m³ calculadas a condiciones locales de presión y temperatura. Para la evaluación de la NOM, solo se utilizaron las estaciones con ≥ 79% de muestreos válidos y con suficiencia trimestral ≥3.

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	Suficiencia trimestral	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLIMIENTO NOM		
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Promedio anual (36 µg/m³)	Máximo promedio 24 h (70 µg/m³)	Cumple
Ciudad de México	Merced	MER	95	4	80	41	15	16	23	20	29	42	52	61	41	80	No
	Pedregal	PED	97	4	58	30	12	11	15	16	22	29	37	45	30	58	Sí
	UAM Iztapalapa	UIZ	100	4	78	41	17	15	21	22	29	41	50	62	41	78	No
Estado de México	La Presa	LPR	93	4	100	50	9	19	18	26	40	49	58	79	50	100	No
	Nezahualcóyotl	NEZ	100	4	79	39	14	16	23	17	26	38	49	61	39	79	No
	Tlalnepantla	TLA	93	4	89	47	23	15	21	28	36	48	57	66	47	89	No
	Xalostoc	XAL	10	0	131	90	53	30	44	56	65	93	109	121	90	131	SS

SS: Sin suficiencia establecida en su NOM; **NA**: No aplica

Tabla A.4.9. Estadísticas básicas de la concentración horaria de **PM_{10} en la CDMX y EDOMEX** reportada por los equipos de **monitoreo continuo**, las unidades son µg/m³ calculadas a condiciones locales de presión y temperatura.

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	Trimestres válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Benito Juárez	BJU	96	4	175	33	2	17	23	13	20	30	43	55
	Camarones	CAM	45	0	295	44	3	23	30	19	27	41	57	75
	Cuajimalpa	CUA	86	3	385	31	1	18	21	12	19	29	40	53
	Gustavo A. Madero	GAM	24	1	153	51	3	24	34	21	32	49	66	82
	Hospital Gral. México	HGM	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Iztacalco	IZT	48	1	216	39	1	21	26	15	25	37	51	64
	Merced	MER	88	4	217	39	2	20	27	17	24	36	51	65
	Miguel Hidalgo	MGH	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Milpa Alta	MPA	68	2	245	35	2	21	25	13	20	30	45	61
	Pedregal	PED	70	2	225	31	1	17	21	13	19	29	40	53
	Santiago Acahualtepec	SAC	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Santa Fe	SFE	73	3	337	28	2	17	21	11	16	25	37	50
	Tláhuac	TAH	75	3	231	42	1	28	35	12	22	37	57	80
	UAM Iztapalapa	UIZ	86	4	196	41	2	21	26	17	26	38	52	67
Estado de México	Acolman	ACO	80	2	411	42	1	28	33	13	22	38	55	75
	Atizapán	ATI	76	2	338	32	1	22	25	10	17	28	42	59
	Chalco	CHO	78	3	346	48	1	28	33	17	28	42	61	83
	Cuautitlán	CUT	87	3	375	44	1	31	34	14	23	37	57	84
	FES Acatlán	FAC	80	3	263	39	1	28	32	11	20	33	52	75
	FES Aragón	FAR	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Instituto. Invest. Nucleares	INN	84	3	249	21	1	14	16	7	11	18	27	38
	Nezahualcóyotl	NEZ	90	3	284	42	1	25	31	15	24	38	55	72
	San Agustín	SAG	81	3	312	45	1	24	30	18	27	41	57	76
	Tlalnepantla	TLA	85	3	550	48	4	26	30	21	31	44	61	80
	Tultitlán	TLI	51	2	661	56	1	41	43	18	30	48	73	103
	Villa de las Flores	VIF	83	3	773	56	1	44	46	16	27	45	73	109
	Xalostoc	XAL	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

NA: No aplica

Tabla A.4.9. Estadísticas básicas de la concentración horaria de **$PM_{2.5}$ en la CDMX y EDOMEX** reportada por los equipos de **monitoreo continuo**, las unidades son µg/m^3 calculadas a condiciones locales de presión y temperatura

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	Trimestres válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Ajusco	AJU	55	1	147	18	1	12	13	6	10	16	23	31
	Benito Juárez	BJU	96	4	141	20	1	12	15	7	11	18	26	35
	Camarones	CAM	45	0	113	23	1	14	17	8	13	21	30	40
	C. Ciencias Atmósfera	CCA	95	4	118	19	1	11	14	7	10	16	24	33
	Gustavo A. Madero	GAM	24	1	84	24	1	13	17	8	14	23	31	41
	Hospital Gral. México	HGM	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Merced	MER	88	4	186	22	1	13	17	7	12	20	29	39
	Miguel Hidalgo	MGH	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Milpa Alta	MPA	68	2	161	20	1	13	15	7	11	17	26	37
	Pedregal	PED	70	2	108	19	1	11	13	7	11	17	24	33
	Santiago Acahualtepec	SAC	66	2	205	26	1	16	19	9	15	24	34	45
	Santa Fe	SFE	73	3	93	16	1	10	11	5	9	13	20	29
	UAM Xochimilco	UAX	92	4	81	18	1	10	15	6	10	17	25	32
	UAM Iztapalapa	UIZ	86	4	144	21	1	12	15	7	12	19	27	36
Estado de México	Ajusco Medio	FAR	80	3	149	18	1	11	13	6	11	17	24	31
	Instituto Invest. Nucleares	INN	84	3	210	12	1	8	9	4	7	11	16	22
	Montecillo	MON	70	2	179	19	1	13	16	5	10	17	26	36
	Nezahualcóyotl	NEZ	87	3	173	19	1	13	15	6	10	17	25	34
	San Agustín	SAG	81	3	189	20	1	12	16	7	11	18	27	35
	Tlalnepantla	TLA	85	3	97	22	1	12	15	8	13	20	28	38
	Xalostoc	XAL	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

NA: No aplica

Tabla A.4.10. Estadísticas básicas para **$PM_{2.5}$** monitoreo **manual**, método de referencia (FRM de U.S. EPA), las unidades son µg/m³ calculadas a condiciones locales de presión y temperatura. Para la evaluación de la NOM, sólo se utilizaron las estaciones con ≥ 75% de muestreos válidos y con suficiencia trimestral ≥ 3.

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	Suficiencia trimestral	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLIMIENTO NOM		
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Máximo promedio 24 h (41 µg/m)³	Promedio anual (10 µg/m³)	Cumple
Ciudad de México	Merced	MER	97	4	42	19	6	8	11	9	14	18	25	29	42	19	No
	Pedregal	PED	100	4	42	15	6	7	9	7	10	14	19	23	42	15	No
	UAM Iztapalapa	UIZ	98	4	42	18	6	8	9	9	13	18	22	27	42	18	No
Estado de México	San Agustín	SAG	90	3	39	17	5	7	9	7	13	17	21	25	39	17	No
	Tlalnepantla	TLA	92	4	42	20	9	7	9	11	15	21	24	29	42	20	No
	Xalostoc	XAL	56	2	43	20	5	11	17	7	12	18	29	37	43	20	SS

SS: Sin suficiencia establecida en su NOM; **NA**: No aplica

Tabla A.4.11. Estadísticas básicas de la concentración horaria de **PMcoarse** reportada por los equipos de **monitoreo continuo**, las unidades son µg/m³ calculadas a condiciones locales de presión y temperatura

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	Trimestres válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Benito Juárez	BJU	96	4	146	13	1	9	10	4	7	12	17	23
	Camarones	CAM	45	0	269	21	1	14	16	7	12	18	28	39
	Gustavo A. Madero	GAM	24	1	101	27	2	15	19	10	16	24	35	46
	Hospital Gral. México	HGM	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Merced	MER	88	4	161	17	1	10	12	6	10	15	22	31
	Miguel Hidalgo	MGH	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Milpa Alta	MPA	68	2	225	15	1	13	12	4	7	12	19	29
	Pedregal	PED	70	2	192	13	1	9	9	4	7	11	16	23
	Santiago Acahualtepec	SAC	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Santa Fe	SFE	73	3	312	13	1	11	10	4	6	10	16	23
	UAM Iztapalapa	UIZ	86	4	158	20	1	13	15	7	11	18	26	35
Estado de México	FES Aragón	FAR	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Inst. Invest. Nucleares	INN	84	3	214	9	1	8	8	2	3	6	11	18
	San Agustín	SAG	81	3	280	26	1	17	19	7	13	21	32	44
	Tlalnepantla	TLA	85	3	520	27	1	18	18	10	16	24	34	46
	Xalostoc	XAL	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Tabla A.4.12. Estadísticas básicas para **temperatura ambiente en la CDMX y EDOMEX**, las unidades están en °C.

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
				Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	19	22.9	11.3	0.6	4.5	6.9	5.9	8.0	10.9	14.9	17.8
	Ajusco	AJU	87	24.3	11.3	-1.8	4.5	6.0	5.3	8.4	11.0	14.4	17.4
	Benito Juárez	BJU	88	30.0	17.9	7.5	4.3	6.3	12.5	14.8	17.4	21.1	23.9
	Cuajimalpa	CUA	30	22.2	14.1	4.7	3.3	4.9	10.2	11.7	13.6	16.6	18.9
	Gustavo A. Madero	GAM	96	31.3	18.7	7.1	4.4	6.3	13.4	15.6	18.1	21.9	24.8
	Hospital Gral. México	HGM	97	30.4	18.2	7.5	4.2	6.0	13.2	15.2	17.6	21.2	24.0
	Lab. Análisis Ambiental	LAA	96	30.7	18.3	7.3	4.5	6.7	12.9	15.0	17.7	21.7	24.8
	Merced	MER	99	31.6	18.7	7.3	4.4	6.3	13.4	15.6	18.2	21.9	24.8
	Miguel Hidalgo	MGH	97	30.1	18.1	8.0	4.2	6.2	13.2	15.0	17.5	21.2	24.0
	Milpa Alta	MPA	84	31.4	16.4	4.2	4.7	7.0	11.0	12.8	15.6	19.8	23.2
	Pedregal	PED	85	31.7	17.5	6.2	4.8	7.0	11.7	14.0	16.6	21.0	24.4
	Santiago Acahualtepec	SAC	63	32.6	15.3	0.7	6.2	9.4	7.8	10.6	14.4	20.0	24.2
	Santa Fe	SFE	25	28.8	15.7	4.3	5.6	9.2	8.6	11.0	15.1	20.2	23.6
	Tláhuac	TAH	97	30.3	16.2	4.2	4.7	6.7	10.5	12.9	15.6	19.6	22.7
	UAM Xochimilco	UAX	99	29.8	16.6	4.6	4.5	6.4	10.9	13.5	16.1	19.9	22.9
	UAM Iztapalapa	UIZ	87	30.5	18.1	6.6	4.1	6.0	13.1	15.2	17.6	21.2	23.8
Estado de México	Ajusco Medio	ACO	84	29.2	15.9	1.8	5.2	7.5	8.9	12.2	15.5	19.7	23.1
	Chalco	CHO	79	31.4	16.8	2.1	4.9	7.2	10.8	13.3	16.3	20.5	23.5
	Cuautitlán	CUT	70	30.4	16.2	0.8	6.0	9.4	8.5	11.6	15.7	21.0	24.6
	FES Acatlán	FAC	32	27.9	14.5	1.4	6.2	10.3	6.6	9.5	13.9	19.8	23.2
	FES Aragón	FAR	99	31.8	19.1	5.8	4.6	6.5	13.3	16.0	18.7	22.5	25.4
	Instituto Invest. Nucleares	INN	99	24.9	11.1	-0.5	5.0	7.6	4.7	7.4	10.5	15.0	18.0
	Montecillo	MON	63	32.3	18.2	4.2	5.1	7.5	12.0	14.5	17.5	22.0	25.4
	Nezahualcóyotl	NEZ	90	31.6	18.4	6.2	4.5	6.2	12.9	15.3	17.9	21.5	24.5
	San Agustín	SAG	99	31.5	18.7	6.4	4.5	6.4	13.1	15.5	18.2	21.9	25.0
	Tlalnepantla	TLA	99	29.9	17.4	5.4	4.5	6.5	11.9	14.2	16.9	20.7	23.7
	Villa de las Flores	VIF	72	30.8	15.9	-0.4	5.5	8.3	9.1	11.8	15.2	20.1	23.6
	Xalostoc	XAL	75	29.6	18.0	6.8	4.1	5.9	13.3	15.1	17.5	21.0	23.7

Tabla A.4.13. Estadísticas básicas para **humedad relativa en la CDMX y EDOMEX,** las unidades están en %

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
				Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	19	99	58	9	19	30	32	44	59	74	84
	Ajusco	AJU	87	100	76	7	24	39	38	60	83	98	100
	Benito Juárez	BJU	100	87	49	1	20	33	23	33	49	66	74
	Cuajimalpa	CUA	55	90	65	9	17	27	40	52	67	79	84
	Gustavo A. Madero	GAM	98	94	54	4	20	33	26	37	55	70	78
	Hospital Gral. México	HGM	97	84	46	4	18	30	21	31	46	61	70
	Lab. Análisis Ambiental	LAA	92	95	51	4	21	35	24	34	52	69	79
	Merced	MER	99	93	50	1	20	32	23	35	52	67	76
	Miguel Hidalgo	MGH	96	85	45	1	20	34	19	29	45	63	72
	Milpa Alta	MPA	52	100	47	2	21	32	21	31	45	63	77
	Pedregal	PED	87	89	49	1	20	33	24	33	49	66	76
	Santiago Acahualtepec	SAC	91	101	54	2	23	39	23	35	54	74	83
	Santa Fe	SFE	72	91	55	3	21	37	24	37	56	74	81
	Tláhuac	TAH	97	85	49	1	19	31	22	34	51	65	73
	UAM Xochimilco	UAX	99	94	53	2	20	32	26	37	54	69	78
	UAM Iztapalapa	UIZ	84	100	52	1	21	35	24	35	53	70	79
Estado de México	Acolman	ACO	84	101	61	1	25	42	26	41	65	83	92
	Chalco	CHO	79	89	54	3	18	29	29	40	56	69	78
	Cuautitlán	CUT	74	95	57	4	23	38	24	38	61	76	85
	FES Acatlán	FAC	94	91	53	1	23	40	22	34	54	74	83
	FES Aragón	FAR	99	96	52	2	21	35	24	35	54	70	79
	Instituto Invest. Nucleares	INN	99	93	67	3	22	36	34	50	73	86	89
	Montecillo	MON	84	92	56	2	22	35	25	39	58	74	83
	Nezahualcóyotl	NEZ	98	88	47	3	19	31	21	32	48	63	71
	San Agustín	SAG	99	100	57	4	23	38	25	38	59	76	85
	Tlalnepantla	TLA	99	84	47	4	19	31	21	32	47	63	71
	Villa de las Flores	VIF	89	92	51	2	21	36	22	34	53	70	78
	Xalostoc	XAL	75	86	45	3	18	30	20	30	46	60	69

Tabla A.4.12. Estadísticas básicas para **velocidad del viento en la CDMX y EDOMEX**, las unidades están en m/s

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										VIENTO	
				Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	% calmas	Dirección
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	59	10.1	2.7	0.0	1.4	1.7	1.1	1.7	2.5	3.4	4.6	0.4	NNO
	Ajusco	AJU	84	9.9	2.4	0.1	1.2	1.4	1.1	1.6	2.2	3.0	4.0	0.2	N
	Benito Juárez	BJU	100	5.9	1.8	0.0	0.9	1.1	0.8	1.1	1.6	2.2	3.0	0.2	NNE
	Cuajimalpa	CUA	53	6.9	2.2	0.5	0.9	1.2	1.1	1.5	2.1	2.7	3.4	0.0	N
	Gustavo A. Madero	GAM	96	7.8	1.9	0.0	1.2	1.4	0.6	1.1	1.6	2.5	3.8	3.0.	NE
	Hospital Gral. México	HGM	97	10.1	2.4	0.4	1.3	1.7	1.1	1.5	2.1	3.2	4.2	0.0	N
	Lab. Análisis Ambiental	LAA	97	6.1	1.8	0.0	1.0	1.4	0.5	1.0	1.7	2.4	3.1	2.2	NNO
	Merced	MER	99	8.1	2.1	0.2	1.0	1.4	1.0	1.3	1.9	2.7	3.7	0.0	N
	Miguel Hidalgo	MGH	97	9.1	2.1	0.0	1.0	1.2	0.8	1.4	2.0	2.6	3.4	0.7	N
	Milpa Alta	MPA	89	9.2	2.8	0.1	1.3	1.6	1.4	1.9	2.6	3.5	4.5	0.1	SO
	Pedregal	PED	100	6.7	1.9	0.0	0.9	1.0	0.9	1.3	1.8	2.3	3.1	0.1	O
	Santiago Acahualtepec	SAC	89	7.5	2.2	0.0	1.4	1.8	0.6	1.3	2.0	3.1	4.2	4.1	NNE
	Santa Fe	SFE	34	8.0	2.6	0.2	1.1	1.2	1.4	1.9	2.5	3.1	4.1	0.0	ONO
	Tláhuac	TAH	97	9.7	2.0	0.0	1.2	1.5	0.7	1.1	1.8	2.6	3.7	2.6	No
	UAM Xochimilco	UAX	99	7.3	2.1	0.1	1.1	1.2	1.0	1.3	1.8	2.5	3.5	0.0	E
	UAM Iztapalapa	UIZ	33	5.5	1.7	0.0	1.0	1.4	0.6	0.9	1.4	2.3	3.1	0.5	NE
Estado de México	Acolman	ACO	83	8.4	2.4	0.4	1.4	1.7	1.1	1.4	1.9	3.1	4.5	0.0	NNO
	Chalco	CHO	75	5.9	1.6	0.0	1.1	1.5	0.5	0.7	1.3	2.2	3.2	2.0	ESE
	Cuautitlán	CUT	87	5.9	1.7	0.0	0.9	1.2	0.6	1.0	1.6	2.2	3.0	0.9	N
	FES Acatlán	FAC	89	5.6	1.8	0.2	0.9	1.2	0.7	1.1	1.6	2.3	3.0	0.1	NO
	FES Aragón	FAR	99	9.2	2.4	0.2	1.3	1.7	1.1	1.4	2.1	3.1	4.3	0.1	NE
	Instituto Invest. Nucleares	INN	100	6.8	1.5	0.0	1.1	1.5	0.2	0.6	1.2	2.1	2.8	10.2	SE
	Montecillo	MON	89	8.7	2.0	0.0	1.5	2.1	0.4	0.8	1.7	2.9	4.3	6.8	NE
	Nezahualcóyotl	NEZ	89	8.4	2.5	0.3	1.3	1.7	1.1	1.5	2.2	3.2	4.5	0.0	NNE
	San Agustín	SAG	86	6.3	1.7	0.0	1.0	1.1	0.7	1.1	1.6	2.2	3.0	2.1	NNE
	Tlalnepantla	TLA	99	9.8	2.5	0.4	1.1	1.6	1.2	1.6	2.3	3.2	4.0	0.0	NNO
	Villa de las Flores	VIF	63	6.5	1.6	0.0	1.2	1.5	0.2	0.7	1.4	2.2	3.3	7.5	NNO
	Xalostoc	XAL	75	13	3.2	0.4	2.1	2.7	1.2	1.7	2.6	4.4	6.4	0.0	N

Tabla A.4.15. Estadísticas básicas para **radiación ultravioleta -A**, las unidades están en W/m^2

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
				Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Lab. Análisis Ambiental	LAA	99	5.316	0.981	0	1.387	1.816	0.0	0.0	0.041	1.816	3.366
	Merced	MER	32	5.740	0.935	0	1.378	1.718	0.0	0.0	0.006	1.718	3.306
	Milpa Alta	MPA	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Pedregal	PED	97	5.922	1.101	0	1.565	2.018	0.0	0.0	0.049	2.018	3.829
	Santa Fe	SFE	54	6.139	1.182	0	1.673	2.143	0.0	0.0	0.077	2.143	4.075
Estado de México	Chalco	CHO	68	6.297	1.156	0	1.632	2.105	0.0	0.0	0.066	2.105	4.001
	Cuautitlán	CUT	79	6.326	1.274	0	1.772	2.444	0.0	0.0	0.045	2.444	4.331
	FES Acatlán	FAC	86	5.234	0.977	0	1.392	1.812	0.0	0.0	0.045	1.812	3.281
	Montecillo	MON	30	5.528	0.964	0	1.384	1.816	0.0	0.0	0.009	1.816	3.277
	San Agustín	SAG	91	6.255	1.235	0	1.752	2.336	0.0	0.0	0.055	2.336	4.300
	Tlalnepantla	TLA	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Tabla A.4.15. Estadísticas básicas para **radiación ultravioleta -B**, las unidades están en W/m^2

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
				Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Lab. Análisis Ambiental	LAA	99	5.284	0.045	0.0	0.072	0.071	0.0	0.0	0.001	0.071	0.170
	Merced	MER	32	5.218	0.039	0.0	0.066	0.056	0.0	0.0	0.0	0.056	0.150
	Milpa Alta	MPA	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Pedregal	PED	97	5.750	0.049	0.0	0.081	0.073	0.0	0.0	0.0	0.073	0.192
	Santa Fe	SFE	54	6.199	0.056	0.0	0.090	0.079	0.0	0.0	0.001	0.079	0.217
Estado de México	Chalco	CHO	68	5.877	0.051	0.0	0.082	0.082	0.0	0.0	0.0	0.082	0.193
	Cuautitlán	CUT	79	5.776	0.054	0.0	0.086	0.089	0.0	0.0	0.0	0.089	0.206
	FES Acatlán	FAC	86	5.057	0.045	0.0	0.070	0.069	0.0	0.0	0.0	0.069	0.167
	Montecillo	MON	30	4.771	0.038	0.0	0.062	0.058	0.0	0.0	0.0	0.058	0.143
	San Agustín	SAG	91	5.223	0.049	0.0	0.076	0.084	0.0	0.0	0.0	0.084	0.184
	Tlalnepantla	TLA	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Tabla A.4.17. Estadísticas básicas para **depósito atmosférico húmedo**

Entidad	Estación	Clave	pp	pH			Depósito total ANIONES (kg/ha)				Depósito total CATIONES (kg/ha)					
			Precipitación total (mm lluvia)	Mínimo pH	Promedio pH	Porcentaje eventos de lluvia ácida (%)	NO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	F^-	NH_4^+	Ca^{2+}	K^+	H^+	Mg^{2+}	Na^+
Ciudad de México	Ajusco	AJU	796	4.1	6.0	21.7	17.87	17.57	2.58	0.18	9.15	4.78	0.98	0.045	0.34	0.66
	CORENA	COR	416	4.2	6.3	12.5	13.04	11.44	1.58	0.11	6.91	3.96	0.66	0.007	0.24	0.39
	Diconsa	DIC	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Ecoguardas Ajusco	EAJ	883	4.7	6.3	9.5	18.00	17.51	1.67	0.14	10.30	6.34	0.67	0.011	0.34	0.53
	Ex Desierto de los Leones	EDL	970	5.3	6.2	11.8	16.4	16.2	1.4	0.1	9.02	6.81	0.80	0.007	0.41	0.69
	Legaria	IBM	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Lab. Análisis Ambiental	LAA	394	5.6	6.7	0.0	11.12	10.29	0.97	0.14	6.17	5.85	0.59	0.001	0.30	0.57
	Lomas	LOM	692	5.7	6.4	0	19.56	16.53	1.60	0.12	10.28	7.78	0.83	0.004	0.40	0.65
	Museo de la CDMX	MCM	450	5.4	6.5	10.5	13.86	11.83	0.66	0.11	7.55	4.92	0.51	0.003	0.30	0.41
	Milpa Alta	MPA	456	4.7	5.9	34.8	15.22	13.56	2.32	0.13	7.70	3.77	0.47	0.022	0.22	0.42
	San Nicolás Totolapan	SNT	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Cerro del Tepeyac	TEC	378	5.8	6.5	0.0	9.47	9.12	0.81	0.10	5.71	4.01	0.41	0.002	0.24	0.38
Estado de México	Montecillo	MON	422	4.5	6.5	5.9	10.0	5.9	0.7	0.1	5.5	3.6	0.5	0.016	0.2	0.2
	Nezahualcóyotl	NEZ	405	5.0	6.6	8.3	11.21	9.43	1.12	0.05	6.45	4.63	0.63	0.003	0.28	0.51
	Tlalnepantla	TLA	443	5.6	6.7	0.0	12.63	13.69	1.05	0.08	7.30	6.62	0.60	0.002	0.33	0.48
	Xalostoc	XAL	402	6.1	6.6	0.0	10.00	10.02	0.82	0.09	5.87	4.65	0.39	0.002	0.24	0.46

ANEXO 5

Historial de contingencias ambientales

Tabla A.5.1. Activación de Fase de **Precontingencia** a partir de 2001 (derogada en 2016).

ACTIVACIÓN					DESACTIVACIÓN	
Año	Contaminante	Fecha y hora	Estación	Valor IMECA	Fecha y hora	Duración
2001	Ozono	13/ene 15:00	TPN	209	13/ene 18.00	3 h
	Ozono	17/ene 15:00	AZC	220	17/ene 19:00	4 h
	Ozono	29/ene 15:00	AZC	231	29/ene 18:00	3 h
	Ozono	13/feb 16:00	AZC	208	13/feb 18:00	2 h
	Ozono	07/mar 14:00	CUA	201	07/mar 17:00	3 h
	Ozono	02/may 14.00	BJU	219	02/may 16:00	2 h
	Ozono	02/may 14:00	PLA	214	02/may 16:00	2 h
	Ozono	24/may 15:00	BJU	205	42-mat 17:00	2 h
	Ozono	28/may 16:00	CUA	213	28/may 18:00	2 h
	Ozono	07/jun 15:00	TAC	209	07/jun 16:00	1 h
	Ozono	07/jun 16:00	PLA	213	07/jun 18:00	2 h
	Ozono	21/jul 15:00	CUA	206	21/jul 18:00	3 h
	Ozono	04/ago 15:00	SUR	203	04/ago 17:00	2 h
	Ozono	18/ago 15:00	SUR	209	18/ago 17:00	2 h
2002	Ozono	16/ene 15:00	PED	219	16/ene 18:00	3 h
	Ozono	15/feb 16:00	PED	209	15/feb 18:00	2 h
	Ozono	15/mar 17:00	TAC	204	15/mar 18:00	1 h
	Ozono	02/abr 14:00	PLA	208	02/abr 16:00	2 h
	Ozono	20/abr 16:00	PLA	207	20/abr 18:00	2 h
	Ozono	22/abr 15:00	AZC	202	22/abr 17:00	2 h
	Ozono	22/abr 16:00	PED	210	22/abr 17:00	1 h
	Ozono	18/sep 15:00	PED	232	18/sep 18:00	Se activó Fase I
	Ozono	23/oct 15:00	PED	202	23/oct 17:00	2 h
	Ozono	21/dic 17:00	EAC	212	21/dic 18:00	1h
2003	PM_{10}	01/ene 11:00	XAL	161	01/ene 00:00	13 h
	Ozono	03/abr 15:00	AZC	209	03/abr 15:00	59 min
	Ozono	10/may 15:00	SUR	204	10/may 15:00	59 min
2004	PM_{10}	25/dic 09:00	XAL	164	25/dic 12:00	Se activó Fase I
2005	—	—	—	—	—	—
2006	PM_{10}	01/ene 09:00	VIF	169	02/ene 03:00	18 h
	PM_{10}	16/mar 19:00	SAG	167	17/mar 17:00	22 h
2007	Ozono	14/abr 16:00	PED	185	16/abr 16:00	48 h
	Ozono	23/jun 15:00	COY	172	24/jun 15:00	24 h
	Ozono	27/jul 16:00	TPN	184	28/jul 16:00	24 h
2008	Ozono	08/abr 16:00	EAC	172	09/abr 16:00	24 h
	Ozono	10/may 17:00	COY	172	11/may 17:00	24 h

Tabla A.5.1. (continuación) Activación de Fase de **Precontingencia** a partir de 2001 (derogada en 2016).

ACTIVACIÓN					DESACTIVACIÓN	
Año	Contaminante	Fecha y hora	Estación	Valor IMECA	Fecha y hora	Duración
2009	Ozono	13/feb 17:00	PED	180	16/feb 17:00	72 h
	PM_{10}	03/nov 22:00	XAL	164	05/nov 09:00	48 h
2010	Ozono	03/may 16:00	EAC	168	05/may 16:00	48 h
	Ozono	31/may 17:00	EAC	172	02/jun 17:00	48 h
	Ozono	04/jun 17:00	UIZ	165	05/jun 17:00	24 h
2011	PM_{10}	11/ene 21:00	XAL	156	12/ene 17:00	20 h
	Ozono	26/mar 16:00	COY	160	27/mar 16:00	24 h
	Ozono	12/may 16:00	PED	161	14/may 16:00	48 h
	Ozono	16/jun 16:00	COY	161	17/jun 16:00	24 h
	Ozono	13/nov 16:00	FAC	156	14/nov 16:00	24 h
2012	Ozono	02/mar 16:00	FAC	153	04/mar 16:00	48 h
	Ozono	11/nov 16:00	PED	159	12/nov 15:00	23 h
	PM_{10}	25/dic 11:00	VIF	152	26/dic 10:00	23 h
2013	PM_{10}	01/ene 10:00	VIF	158	02/ene 10:00	24 h
	Ozono	22/abr 17:00	NEZ	164	23/abr 20:00	27 h
	Ozono	27/abr 15:00	MER	159	27/abr 20:00	29 h
	Ozono	02/may 17:00	PED	157	03/may 20:00	27 h
	Ozono	09/may 17:00	IZT	158	11/may 20:00	51 h
	Ozono	21/may 16:00	UAX	151	22/may 20:00	28 h
2014	Ozono	20/feb 17:00	FAC	159	21/feb 20:00	27 h
	Ozono	20/mar 16:00	CUA	160	21/mar 20:00	28 h
	Ozono	09/may 16:00	SUR	156	10/may 20:00	28 h
2015	Ozono	03/mar 17:00	CUA	155	04/mar 20:00	27 h
	Ozono	08/abr 17:00	SFE	159	10/abr 19:00	50 h
	Ozono	05/may 16:00	IZT	157	06/may 18:00	26 h
	Ozono	09/may 17:00	PED	161	10/may 20:00	27 h
	Ozono	10/jun 16:00	COY	152	12/jun 17:00	49 h
	Ozono	04/oct 16:00	FAC	170	05/oct 17:00	25 h
	PM_{10}	25/dic 08:00	VIF	151	26/dic 12:00	28 h
2016	Ozono	19/feb 16:00	CHO	157	20/feb 17:00	25 h
	Ozono	21/feb 15:00	GAM	155	22/feb 20:00	29 h
	Ozono	12/mar 17:00	GAM	159	14/mar 16:00	Pasó a Fase I
	Ozono	04/abr 18:00	BJU	155	05/abr 17:00	Pasó a Fase I

A partir del 6 de abril 2016, las autoridades Federales decidieron reducir el umbral de activación de la Fase I y se usó el límite de 155 ppb que correspondía al valor de Pre contingencia, con esto desaparece la Fase de Pre contingencia

Tabla A.5.2. Activación de Fases de **Contingencia** I y II, Regional y Extraordinaria entre 2001 y 2021

ACTIVACIÓN						DESACTIVACIÓN	
Año	**Contaminante**	**Fecha y hora**	**Estación**	**Valor IMECA**	**Fase**	**Fecha y hora**	**Duración**
2001	—	—	—	—	—	—	—
2002	Ozono	18/sep 16:00	PED	242	Fase I	19/sep 16:00	24 h
2003	PM_{10}	25/dic 12:00	XAL	176	Fase I	26/dic 12:00	24 h
2004	—	—	—	—	—	—	—
2005	PM_{10}	01/ene 08:00	VIF	181	Regional	02/ene 08:00	24 h
2006 a 2015	—	—	—	—	—	—	—
2016	Ozono	14/mar 16:00	CUA	194	Fase I	17/mar 16:00	72 h
	Ozono	05/abr 17:00	AJM	156	Fase I*	06/abr 17:00	24 h
	Ozono	02/may 15:00	BJU	161	Fase I*	05/may 17:00	74 h
	Ozono	14/may 17:00	TAH	157	Fase I*	15/may 15:00	22h
	Ozono	20/may 15:00	SFE	178	Fase I*	21/may 17:00	26 h
	Ozono	24/may 15:00	CAM	151	Fase I*	24/may 21:00	06 h
	Ozono	27/may 15:00	GAM	165	Fase I*	28/may 18:00	27 h
	Ozono	31/may 16:00	MGH	155	Fase I*	01/jun 18:00	26 h
	Ozono	08/jul 17:00	SFE	152	Fase I*	09/jun 15:00	22 h
	Ozono	11/ago 16:00	AJM	151	Fase I*	12/ago 17:00	25 h
2017	PM_{10}	06/ene 09:00	XAL	153	F1 Regional	07/ene 09:00	24 h
	Ozono	15/may 16:00	AJM	151	Fase I*	21/may 19:00	147 h
	Ozono	22/may 15:00	GAM	162	Fase I*	24/may 18:00	51 h
	PM_{10}	14/dic 11:00	SAG	154	F1 Regional	15/dic 09:00	22 h
2018	Ozono	06/jun 16:00	PED	161	Fase I*	07/jun 16:00	24 h
	PM_{10}	25/dic 11:00	VIF	152	F1 Regional	26/dic 10:00	23 h
2019	PM_{10}	01/ene 09:00	VIF	157	F1 Regional	02/ene 10:00	25 h
	Ozono	30/mar 15:00	PED	155	Fase I	31/mar 15:00	24 h
	Ozono	10/abr 17:00	PED	152	Fase I	11/abr 15:00	22 h
	Ozono	16/abr 17:00	CAM	154	Fase I	18/abr 15:00	46 h
	$PM_{2.5}$ y Ozono*	14/may 15:00	NEZ PED	161 142	Contingencia Extraordinaria	17/may 19:00	74 h
	$PM_{2.5}$	25/dic 11:00	NEZ	155	F1 Regional	26/dic 10:00	23 h
2020	Ozono	11/nov 16:00	CCA	155	Fase I	12/nov 01:00	20 h
2021	Ozono	21/abr 18:00	TLI	160	Fase I	22/abr 20:00	26 h
	Ozono	26/abr 16:00	CCA	159	Fase I	27/abr 18:00	24 h
	Ozono	08/jun 16:00	CCA	157	Fase I	08/jun 20:00	04 h
	$PM_{2.5}$	25/dic 11:00	SAC	99.9	Fase I regional	26/dic 03:00	28 h
2022	Ozono	29/mar 16:00	SFE	162	Fase I	30/mar 17:00	25 h
	Ozono	02/may 17:00	BJU-CCA	169	Fase I	04/may 20:00	51 h
	Ozono	05/may 16:00	BJU	168	Fase I	06/may 20:00	26 h
	Ozono	20/may 15:00	CUA	160	Fase I	21/may 17:00	26 h
	Ozono	07/jun 17:00	SFE	156	Fase I	08/jun 15:00	22 h
	Ozono	12/nov 15:00	CCA	155	Fase I	14/nov 17:00	50 h

— No se activó contingencia

ANEXO 6

Mosaicos de calidad del aire

MOSAICOS

Partículas menores a 2.5 µm ($PM_{2.5}$)

LEYENDA

Concentración	Color
0 - 10 µg/m³	
11 - 20 µg/m³	
21 - 30 µg/m³	
31 - 40 µg/m³	
41 - 50 µg/m³	
51 - 60 µg/m³	
61 - 70 µg/m³	
71 - 80 µg/m³	
81 - 90 µg/m³	
> 90 µg/m³	

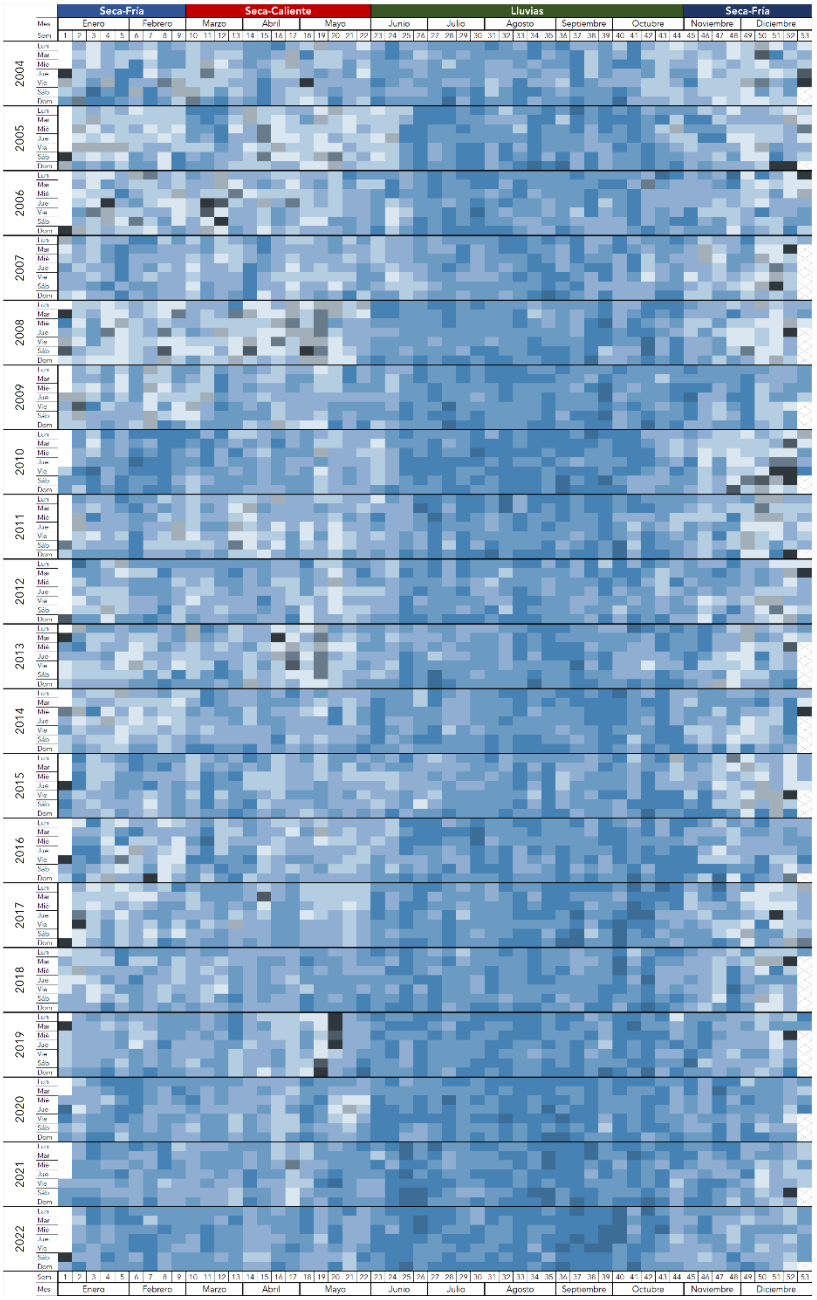


Figura A.6.1. Mosaico de $PM_{2.5}$. Cada celda es el máximo diario del promedio de 24 h del 2004 al 2022. Para fines comparativos, el color de la celda indica la concentración de $PM_{2.5}$ de acuerdo con los intervalos y a los colores de la escala.

Partículas menores a 10 µm (PM_{10})

LEYENDA

Concentración	Color
0 - 25 µg/m³	
26 - 50 µg/m³	
51 - 75 µg/m³	
76 - 100 µg/m³	
101 - 125 µg/m³	
126 - 150 µg/m³	
151 - 175 µg/m³	
176 - 200 µg/m³	
> 200 µg/m³	

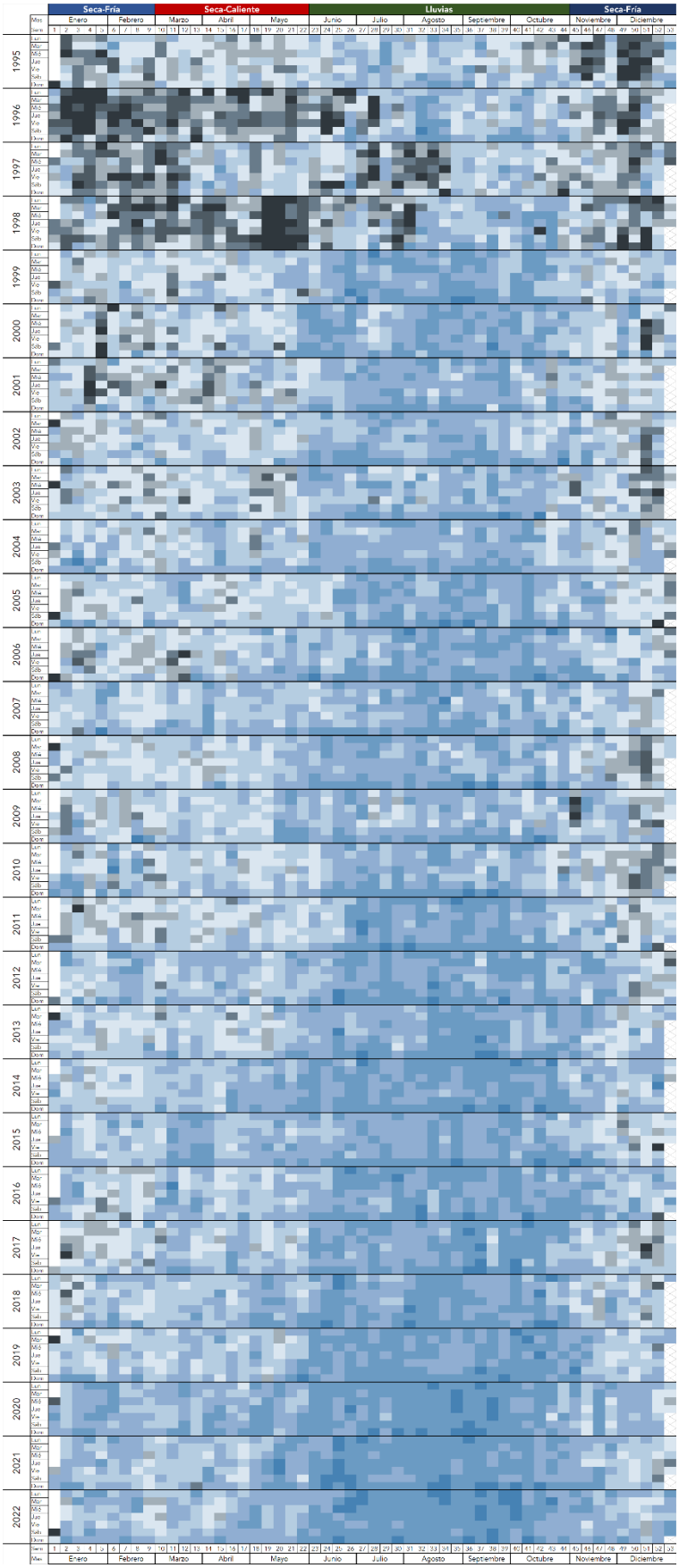


Figura A.6.2. Mosaico de PM_{10}. Cada celda es el máximo diario del promedio de 24 h del 1995 al 2022. Para fines comparativos, el color de la celda indica la concentración de PM_{10} de acuerdo con los intervalos y a los colores de la escala.

Ozono (O_3)

LEYENDA

Concentración	Color
0 - 25 ppb	
26 - 50 ppb	
51 - 75 ppb	
76 - 100 ppb	
101 - 125 ppb	
126 - 150 ppb	
151 - 175 ppb	
176 - 200 ppb	
201 - 225 ppb	
> 225 ppb	

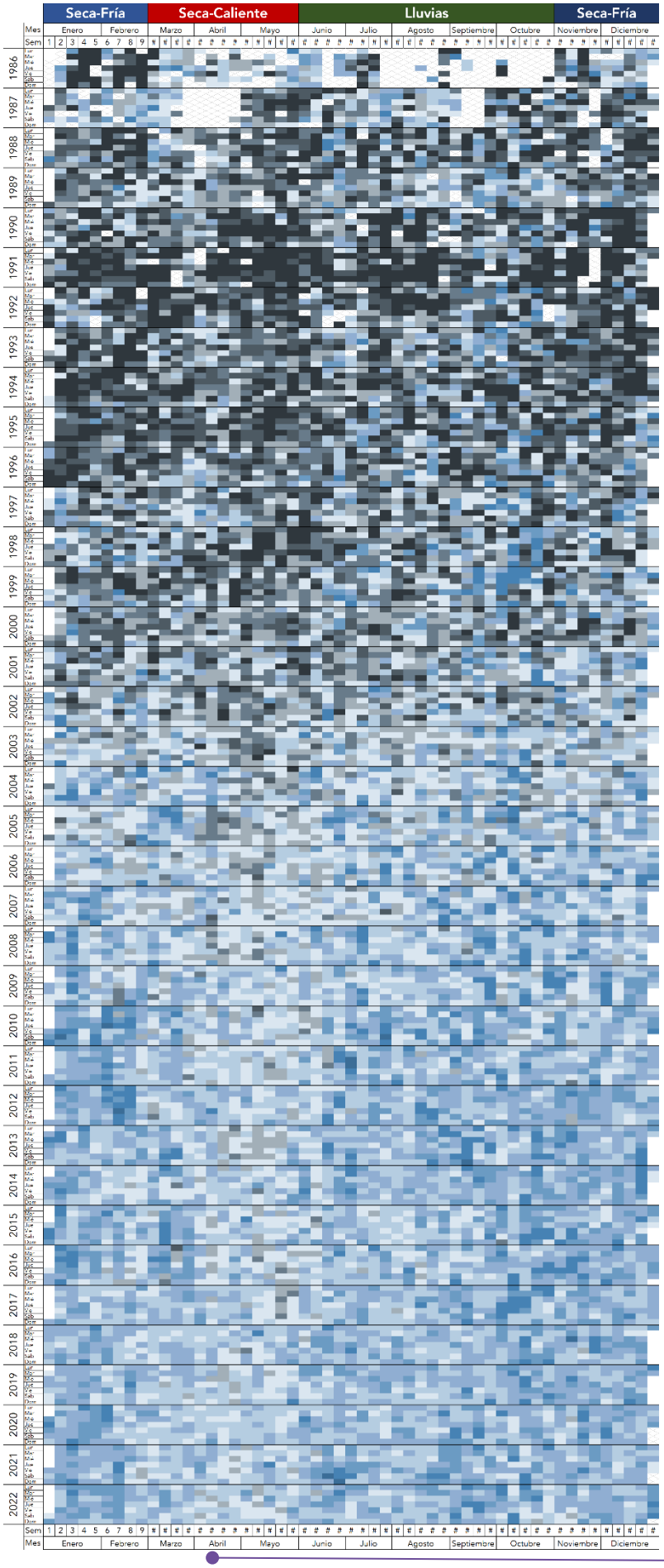


Figura A.6.3. Mosaico de O_3. Cada celda es el máximo diario del promedio 1 h de 1986 al 2022. Para fines comparativos, el color de la celda indica la concentración de ozono de acuerdo con los intervalos y a los colores de la escala.

www.aire.cdmx.gob.mx

@Aire_CDMX

App: AIRE

Disponible para:

GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO | SEDEMA | CALIDAD DEL AIRE