35 AÑOS
1986-2021
Monitoreo Atmosférico

INFORME ANUAL 2021

CALIDAD DEL AIRE

Ciudad de México

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

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

En el 2021, el INEGI publicó los resultados del Censo de Población y Vivienda 2020, donde se contaron más de 126 millones de mexicanos y el Estado de México es la entidad más poblada con 16,992,418 personas, mientras que en la Ciudad de México (CDMX) habitan 9,209,944 habitantes. Esta alta densidad de habitantes en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), conlleva a mayores emisiones de contaminantes y, en consecuencia, más presión sobre la calidad del aire. En el tiempo meteorológico, se presentó un ciclón en la costa Atlántica y cinco en el Pacífico; sin embargo, la sequía afectó al centro del país. La falta de agua propicia la propagación de incendios forestales y de acuerdo con la Comisión de Recursos Naturales (CORENA), el período de agosto de 2020 a julio de 2021, se registró un total de 1,913 incendios forestales en la CDMX, que afectaron 4,591 Ha, con el área más dañada en Milpa Alta con 2,790 Ha. En términos de calidad del aire, los incendios están relacionados con el incremento de partículas en el aire, lo cual se ha observado en diversos eventos de incendios con niveles elevados de partículas.

Durante el año 2021 continuó la pandemia COVID-19 a nivel mundial y en noviembre se registraron alrededor de 5 millones de muertes en el mundo. Las medidas de restricción para controlar el contagio incluyeron a los Juegos Olímpicos de Tokio, los cuales se celebraron a puerta cerrada. La frontera entre México y Estados Unidos se mantuvo cerrada por 20 meses, la cual abrió hasta noviembre del 2021. En la ZMCM se mantuvieron las actividades a distancia, sin clases ni trabajo presenciales. La pandemia también afectó la operación del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT), debido a que no fue posible dar el mantenimiento a las estaciones ubicadas en hospitales, clínicas y escuelas.

El SIMAT vigila y monitorea la calidad del aire de la CDMX, además provee de información sobre la concentración de los contaminantes criterio, parámetros meteorológicos y depósito atmosférico. Actualmente es el sistema de monitoreo más grande del país y una de las más importantes en Latinoamérica. A partir de la información del SIMAT, se han desarrollado políticas públicas para mejorar la calidad del aire, así como observar la tendencia de los contaminantes a través del tiempo. El SIMAT difunde información todos los días del año, con la finalidad de que la población conozca la calidad del aire y el riesgo de exposición a la contaminación o a la radiación solar, especialmente para las personas más susceptibles.

En el presente Informe Anual de Calidad del Aire 2021, se realizó una cronología de los cambios más importantes del SIMAT a través de 35 años de monitoreo en la ZMCM (Capítulo 1), el capítulo 2 presenta el análisis del cumplimiento de la normatividad para cada contaminante criterio. Posteriormente, en el Capítulo 3: Tiempo, se explica el comportamiento de las variables meteorológicas durante el año. El análisis de la calidad del aire, la tendencia histórica por contaminante y el comportamiento del Índice AIRE y SALUD, se presenta en los Capítulos 4 y 5, respectivamente. En el Capítulo 5 se presenta el detalle de los eventos de alta concentración de ozono y partículas que activaron contingencias durante 2021. Finalmente, el Capítulo 6 contiene los resultados del análisis al depósito atmosférico y su contenido iónico, así como el comportamiento de la lluvia ácida.

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

Diseño
Paola Guadalupe Hernández Sánchez
Montserrat Martínez Mendoza

Integración del documento
Mónica del Carmen Jaimes Palomera, Cintia Gabriela Reséndiz Martínez, Citlalli Mendoza Munguía, Jorge Luis Lara Osorio, Olivia Rivera Hernández.

Gráficas y estadísticos
Citlalli Mendoza Munguía
Claudia Lizeth Florean Cruz
Brenda González Calderón

D.R. © 2023

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 2021**. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire.

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, Eduardo Preciado Martínez, Jorge Lara Osorio, Fernanda Moreno Gillestegui, Citlalli Mendoza Munguía, Ángel Fragoso Chino, Laura Ocampo Trejo, Omar Quijada Pérez, Brenda González Calderón, Claudia Lizeth Florean Cruz, Víctor Taracena Morales.

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

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

Subdirección de Sistemas y Comunicaciones
José Luis del Río Jáuregui, Juan Manuel Arriaga Cosío, Mauricio Hernández Mote, Leyda Castro Rodríguez, Julio César Martínez Alpízar, Gabriela Hernández Cruz, María Gabriela Holguín Pacheco, Víctor Octavio Valdés Espinosa, Jorge Cornejo Martínez, Víctor Manuel Muñoz Valladares, Luis Enrique Ruiz López, Christian A. Martínez Lozano.

Administración
Margarita Barrientos Contreras, Xóchitl Loretto Carmona, Adriana Ramírez Tecla, Francisco Serrano V., Carla Mayorga Domínguez, Samuel López V., Stephanie Montero B, Juan Manuel 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 Geofísica UNAM.

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

Instituto de Geofísica (**radiación solar global**): Dr. Mauro Valdés Barrón

También se reconoce todo el apoyo brindado por las diferentes áreas operativas de la Dirección Ejecutiva de Administración.

ÍNDICE

Resumen ejecutivo 11

Capítulo 1: Historia del SIMAT, 35 aniversario del monitoreo continuo 12
- Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA) 15
- Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) 17
- Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET) 21
- Red de Depósito Atmosférico (REDDA) 23
- Otros componentes del SIMAT 25

Capítulo 2: Cumplimiento de la normatividad 28
- Dióxido de azufre 33
- Dióxido de nitrógeno 36
- Monóxido de carbono 39
- Ozono 42
- Partículas 46
- Partículas PM_{10} 48
- Partículas $PM_{2.5}$ 50

Capítulo 3: El Tiempo 54
- Temperatura 55
- Humedad relativa 60
- Precipitación 63
- Viento 66
- Presión atmosférica 70
- Radiación solar ultravioleta 72
- Índice UV 76

Capítulo 4: Calidad del aire 78
- Dióxido de azufre 82
- Óxido de nitrógeno 85
- Monóxido de carbono 90
- Ozono 93
- Partículas suspendidas (PM_{10}, $PM_{2.5}$ y $PM_{10-2.5}$) 97

Capítulo 5: Índice de calidad del aire 104
- Índice AIRE y SALUD 105
- Índice de riesgo para personas susceptibles (IRPS) 111

Capítulo 6: Eventos de alta concentración 114
- Activación Fase I O_3: 21 de abril 119
- Activación Fase I O_3: 26 de abril 121
- Activación Fase I O_3: 08 de junio 123
- Activación Fase I regional $PM_{2.5}$: 25 de diciembre 125

Capítulo 7: Depósito atmosférico **128**
¿Cómo se forma la lluvia ácida? **129**
Campaña 2021 **131**
Precipitación y pH **132**
Composición iónica **138**
Depósito Atmosférico **139**

Referencias **140**

Anexos
I. Sistema de Monitoreo Atmosférico de la CDMX **152**
II Operación del SIMAT **158**
III. Estaciones nuevas **166**
IV. Estadísticas básicas **168**
V. Historial de contingencias ambientales **184**
VI. Mosaicos de calidad del aire **188**

Dedicamos este Informe:

A todas las personas que han formado parte del SIMAT a lo largo de estos 35 años y en especial a las que ya no se encuentran con nosotros.

ACRÓNIMOS

Acrónimo/ Abreviatura	Definición
CAMe	Comisión Ambiental de la Megalópolis, incluye a los estados de México, Puebla, Tlaxcala, Morelos, Hidalgo, Querétaro y Ciudad de México
CDMX	Ciudad de México
CN	Carbono negro
CNe	Carbono negro equivalente
OC	Carbono orgánico
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal
EC	Carbono elemental equivalente al carbono negro
U. S. EPA	Environmental Protection Agency – Agencia de Protección del Medio Ambiente USA
HAP	Hidrocarburos aromáticos policíclicos
hPa	Hectopascal unidad de presión que equivale a 100 Pascales, 1 Pa equivale a $9.8x10^{-6}$ atmósferas o $1x10^{-5}$ Bar
HR	Humedad relativa, en inglés relative humidity (RH)
IAyS	Índice Aire y Salud
ICA	Índice de Calidad del Aire
IRPS	Índice de Riesgo para Personas Susceptibles
IUV	Índice de radiación ultravioleta
NADP	National Atmospheric Deposition Program – Programa Nacional de Depósito Atmosférico
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Admininstration – Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica
NOM	Norma Oficial Mexicana
OMM - WMO	World Meteorological Organization - Organización Meteorológica Mundial
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
SEDEMA	Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México
SGIRPC	Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil
SIMAT	Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México
SS o SSA	Secretaría de Salud del Gobierno Federal
T o TMP	Temperatura
UV-A y UV-B	Radiación ultravioleta A y ultravioleta B
WSP o VV	Velocidad del viento, en inglés wind speed (WSP)
WDR o DV	Dirección del viento, en inglés wind direction (WDR)
ZMCM	Zona Metropolitana de la Ciudad de México conformada por 16 alcaldías de la Ciudad de México y 29 municipios conurbados del Estado de México, es el área determinada por la cobertura espacial de las estaciones del SIMAT.
ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México, conformada por 16 alcaldías de la Ciudad de México, 59 municipios conurbados del Estado de México y un municipio del Estado de Hidalgo

ESTACIONES DE MONITOREO

Sitios en la 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
Sitios en el 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 2021, el SIMAT cumplió 35 años de operación y actualmente tiene 44 sitios de monitoreo distribuidos en 4 subredes, un laboratorio de análisis ambiental, una estación móvil de monitoreo, un Sistema de Pronóstico de la Calidad del Aire (AQFS-MexDF), así como una página web que difunde la información. Los inicios del SIMAT fueron en octubre de 1986, con la creación de la RAMA, que comenzó con 25 estaciones automáticas que medían CO, SO_2, NO_2, NOx y O_3; en ese mismo año se implementó el IMECA. En 1994, la RAMA ya contaba con 32 estaciones. Para el año 2002, se inició con el monitoreo de $PM_{2.5}$ y del 2010 al 2012 el SIMAT fue rediseñado y reforzado.

En términos de normatividad de calidad del aire durante 2021, el SO_2 excedió los dos límites normados con un máximo de 102 ppb para el indicador de una hora (límite: 75 ppb) y 43 ppb para el de 24 horas (límite: 40 ppb). El NO_2 y el CO cumplieron con los valores establecidos en sus respectivas NOM. Sin embargo, el O_3 superó los dos límites y registró 696 horas que excedieron 95 ppb (indicador horario) y el promedio móvil de 8 horas fue 126 ppb (límite: 70 ppb). Las PM_{10} superaron ambos valores de su NOM con 120 µg/m^3 en el promedio diario (límite: 75 µg/m^3) y 55 µg/m^3 en el promedio anual límite: 40 µg/m^3). Finalmente, las $PM_{2.5}$, cumplieron con el promedio diario con 43 µg/m^3 (límite: 45 µg/m^3); sin embargo, en el promedio anual fue de 20 µg/m^3 (límite: 12 µg/m^3).

La temperatura en 2021 registró un promedio anual de 16.6 °C, con el máximo mensual en abril (18.6 °C) y el mínimo en noviembre (14.3 °C). La humedad relativa durante la temporada seca (noviembre-abril) registró un promedio de 34 %, en la temporada húmeda (mayo-octubre) fue del 70 %. El mes más lluvioso fue junio con 169 mm acumulados. Los vientos dominantes fueron del noreste hacia el suroeste; en diciembre se registró la velocidad de viento mínima con 1.6 m/s, mientras que abril y mayo registraron los máximos con 2.36 m/s. La presión atmosférica tuvo un promedio anual de 584.9 mmHg. Los valores promedio para radiación UV-A y UV-B fueron de 1.765 y 0.750 W/m^2, respectivamente. El índice de radiación ultravioleta (IUV) registró 203 días en la categoría Extremadamente Alta durante 2021, con los máximos en mayo, julio y septiembre.

Los datos de la RAMA indican que el promedio anual de SO_2 fue 2.9 ppb, con los máximos en el norte de la ZMCM, en febrero y marzo. Los promedios anuales para NOx, NO_2 y NO fueron 34, 21 y 13 ppb, respectivamente, y diciembre registró los máximos. El CO obtuvo un promedio anual de 0.39 ppm y la estación LPR, registró el promedio anual máximo de 0.6 ppm. En O_3 se observó que las estaciones del sur y centro presentaron la mayor cantidad de horas que superan el límite normado, con el máximo en CCA (371 horas). En las partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ se registraron los máximos en el norte y centro, en los sitios CUT, SAG, TLA y ACO, principalmente en marzo y diciembre, cuando se registraron los promedios de 61.2 y 56.4 µg/m^3 para PM_{10} y $PM_{2.5}$, respectivamente. Durante 2021, el programa de contingencias se activó cuatro veces, de las cuales tres fueron de O_3 y una se activó por $PM_{2.5}$, ocasionada por el uso de pirotecnia. Las contingencias se activaron: del 21 al 22 de abril (máximo O_3: 160 ppb) en TLI; 26 al 27 de abril (máximo O_3: 159 ppb) en CCA; 8 de junio (máximo O_3: 157 ppb) en CCA y del 25 al 26 de diciembre (promedio móvil 24 horas de $PM_{2.5}$: 99.9 µg/m^3) en SAC.

La REDDA tiene 16 sitios de monitoreo, pero en 2021, la pandemia COVID afectó el muestreo de REDDA y solamente funcionaron 9. La campaña de muestreo fue de mayo a octubre 2021. Los meses con mayor proporción de eventos ácidos fueron agosto con 22.9 % y junio con 15.14 %. La muestra más ácida la registró AJU en julio, cuando se llegó a un pH de 4.6, dicha estación presentó el 36% de eventos ácidos.

CAPÍTULO 1

Historia del SIMAT, 35 aniversario de monitoreo

EL SISTEMA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO (SIMAT)

El SIMAT es uno de los principales instrumentos de gestión de las políticas ambientales del aire de la Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA) del Gobierno de la Ciudad de México, con él se evalúa la eficacia de las acciones implementadas en la región metropolitana, además de realizar la vigilancia de la calidad del aire a través del l monitoreo continuo de los principales contaminantes del aire. La información generada por el SIMAT se difunde en diferentes medios de comunicación: la radio, la televisión, el internet y las redes sociales, lo cual ha propiciado que los habitantes de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) incorporen la información sobre la calidad del aire como un dato cotidiano, con la finalidad de cuidar su salud.

La dinámica de la ZMCM es un factor importante que influye directamente en la calidad del aire. Las actividades diarias en la ciudad determinan el tipo de contaminantes, su concentración en la atmósfera, el momento del día en que aumentan, así como el lugar donde son emitidos, o bien, donde se recibe su impacto debido al transporte ocasionado por el viento. Por estas razones, las emisiones en las áreas residenciales son diferentes las zonas comerciales, de servicios, industriales o agrícolas. Debido a lo anterior, para la instalación de un sitio de monitoreo es importante analizar todas las características del sitio donde se instalará, el entorno que la rodeará, los recursos disponibles, así como los objetivos de monitoreo que la estación tendrá.

Durante los 35 años de operación continua, el SIMAT ha presentado cambios que le permitieron mejorar su eficacia y confiabilidad. Los cambios más importantes, iniciaron en diciembre del año 2000. La SEDEMA, a través de la Dirección General de Monitoreo Atmosférico, integró de los programas de monitoreo existentes en la ZMCM, con la finalidad de hacer un uso eficiente de los recursos, alinear los objetivos y productos con las necesidades de la gestión, así como armonizar los procedimientos de medición, transmisión, validación y difusión de la información bajo un esquema de mejora continua basado en el Sistema de Gestión de Calidad establecido en la Norma ISO 9001:2000 (vigente en 2000). Cada programa se integró como un subsistema conservando su infraestructura y diseño, con objetivos de monitoreo propios: RAMA, REDMA, REDMET, REDDA, LAA, CICA, Unidad Móvil y Centro de Datos. El resultado de este proceso se denominó Sistema de Monitoreo Atmosférico o SIMAT que actualmente está integrado por 4 redes con un total de 44 estaciones de monitoreo.

En este capítulo se presenta la evolución y descripción del SIMAT, así como de los subsistemas que lo conforman. En la **Figura 1.1** se observa la línea de tiempo del SIMAT con los acontecimientos más relevantes a través de su historia.

EVOLUCIÓN DEL MONITOREO ATMOSFÉRICO EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

1960 Comienzo

1958. Primeras mediciones en la CDMX
1966. Primera red de monitoreo manual (REDMA) con 4 sitios
1967. Red Panamericana (PANAIR) con 14 sitios

1970 Inicios

1973. El PNUD refuerza la red manual con 22 sitios.
1974. Red Philips o Red computarizada automática de monitoreo atmosférico del Valle de México (RCAMA-VAMEX) con 20 sitios.

1980 Inicios

1986. Inicia Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) con 25 sitios y la REDMET cuenta con 10 sitios.
1988. Inicia el programa de precipitaciones ácidas con 4 sitios y crece a 8 sitios. La REDMA tiene 18 sitios, se inicia el monitoreo de PM10

1990 Crecimiento

1990. La REDMA cuenta con 19 sitios
1993. El gobierno federal transfiere el monitoreo atmosférico a la Ciudad de México
1994. Se refuerza la RAMA y son 32 sitios
1995. Inicia el monitoreo automático de PM10
1997. Se adquieren colectores automáticos para el programa de precipitaciones ácidas (PPA).
1998. Inicia la medición de radiación UV en 8 sitios de la RAMA y el Programa de precipitaciones ácidas cuenta con 16 sitios.

2000 Consolidación

2000. Se crea el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la CDMX (SIMAT).
2001. Se refuerza la REDMET con 5 torres, cuenta con 15 sitios. El programa de Precipitaciones ácidas se convierte en la Red de Depósito Atmosférico (REDDA).
2003. Inicia la medición de las PM2.5, se activan 4 sitios más y la RAMA tiene 34 estaciones.
2006. Se reactiva el laboratorio de análisis ambiental y se instala el laboratorio de gravimetría y medición atómica.
2007. Se rediseña la RAMA con Acolman, Iztacalco y Chalco y cuenta con 35 sitios.

2010 Inovación

2010. Rediseño del SIMAT, 11 sitios salen de operación, reubicación de XAL y se refuerzan 20 sitios. La RAMA tiene 34 estaciones..
2012. Continua el rediseño, se incorporan 5 sitios nuevos, reactivación de NEZ y la RAMA cuenta con 29 sitios. Inician campañas de monitoreo continuo de BTEX y COV. Adquisición del analizador de aerosoloes (MARGA). Reforzamiento de REDMET (18 sitios), con la adquisición del perfilador de viento, temperatura y humedad. Se adquieren equipos para medir carbono negro.
2013. Se realiza la campaña de especiación de partículas 2013-2014.
2014. Se refuerza la RAMA con 6 sitios nuevos y ahora cuenta con 36 estaciones.
2016. Se refuerza y modifica la REDMET, cuenta con 26 sitios.
2017. Se integra el Sistema de Pronóstico de Calidad del Aire de la CDMX (AQFS-MexDF). Se desinstalan dos estaciones COY y SJA debido al terremoto.
2018. Se adquiere el Termodesorbedor de Aerosoles Orgánicos (TAG-GC-MS)
2019. Se reubican las dos estaciones que se quitaron por el terremoto ahora son SAC y FAR, la RAMA cuenta con 34 sitios y la REDMET con 28 sitios.

2020 Actualmente

2021. El SIMAT cuenta con el laboratorio de estándares, el laboratorio de calibración, el de Análisis ambiental, unidad móvil, el Centro de Información de Calidad del Aire (CICA), el centro de datos, el AQFS-MexDF y con 44 sitios de monitoreo:
RAMA: 34 sitios
REDMET: 28 sitios
REDMA: 9 sitios
REDDA: 16 sitios

Figura 1.1. Línea de tiempo de la historia del SIMAT

Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA)

La REDMA permite evaluar el estado de la calidad del aire respecto a las partículas en suspensión y los elementos contenidos en estas, como la determinación de Plomo (Pb). La red se implementó bajo los criterios internacionales de la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos (U.S. EPA, por sus siglas en inglés) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). La información histórica que ha proporcionado esta red es un elemento valioso para evaluar indirectamente el impacto de acciones específicas de prevención y control de la contaminación. Esta información es complementaria a la que proporcionan la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) y la Red de Depósito Atmosférico (REDDA).

Actualmente la REDMA tiene nueve sitios de monitoreo, en los cuales se mide la concentración de partículas en tres categorías: **1)** Partículas Suspendidas Totales (PST) en tres estaciones de monitoreo, las PST tienen un tamaño entre 100 y 10 micrómetros (μm); **2)** partículas menores o igual a 10 μm (PM_{10}), denominadas fracción respirable, se miden en ocho sitios y **3)** partículas menores o igual a 2.5 μm ($PM_{2.5}$), denominadas como la fracción fina, se muestrean en seis estaciones. La medición de partículas se realiza cada 6 días, esto es para evitar el sesgo estadístico de muestrear siempre en un mismo día. Las muestras son colectadas sobre un filtro y la determinación del peso es por método gravimétrico (pesado). Las muestras de la REDMA se utilizan para obtener componentes de las partículas como el plomo, sulfatos y nitratos. El proceso del acondicionamiento, determinación del peso y análisis de las muestras, así como el cálculo de la concentración, se realiza en el Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA) de la Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire de la SEDEMA. La configuración de esta red ha variado con el tiempo, siguiendo sus objetivos del monitoreo. Es importante mencionar que todos los equipos utilizados actualmente en la REDMA, son designados como Método de Referencia por la U.S. EPA.

Años 1960-1979

La historia de la REDMA inició en los últimos años de la década de los 60, por medio del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) de la Organización Panamericana de la Salud (OPS); con el que se decidió incorporar una red de estaciones de muestreo en la Ciudad de México, como parte de la Red Panamericana de Muestreo Normalizado de la contaminación del Aire (**RedPanaire**), que inició la recolección de muestras mensuales de polvo sedimentable (PS) con cubetas expuestas a la intemperie, así como muestras diarias de partículas totales en suspensión (PST) y de SO_2 (Korc M. y Saenz R., 1999); la red tenía 4 sitios de muestreo: Tlalnepantla, Aeropuerto, Centro de la Ciudad y Tacuba (**Figura 1.2a**). En 1972 se incorporaron 10 sitios más y la red tenía un total de 14 estaciones. En 1978, se adquirieron colectores conocidos como “alto volumen”, para medir la concentración de PST y se mantuvieron los mismos 14 sitios.

Años 1980-1999

A partir de 1986, las muestras de PST se utilizaban para la determinación del contenido de plomo (PbPST) y en ese año, la red aumentó a 16 sitios. En 1988 comenzó la medición de las partículas PM_{10} con los equipos de "alto volumen" utilizando un fraccionador para este tamaño de partículas, las muestras de PM_{10} también se usaron para la determinación de plomo; y para el año 1990, se tenían 19 sitios de monitoreo (**Figura 1.2b**).

Años 2000-2009

A partir del 2003, se inició la medición de la concentración de $PM_{2.5}$; en este año, solamente se contaba con 13 sitios de monitoreo, incluidos los que median $PM_{2.5}$. En el 2005, se quitó la estación Hangares (HAN), por lo que se redujo a 12 sitios.

El proceso de tratamiento de las muestras también ha tenido modificaciones; anteriormente, el acondicionamiento, pesado y análisis de las muestras, así como el cálculo de la concentración de PST, PbPST, PM_{10} y $PbPM_{10}$, se realizaba en el Laboratorio de Análisis Ambiental de la Facultad de Química de la UNAM, esto fue hasta 2002, debido a un convenio con la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (GDF). Al siguiente año, el pesado de los filtros (incluyendo el inicio de la medición de $PM_{2.5}$) y la determinación de plomo fue realizado por el Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental (CENICA) del Instituto Nacional de Ecología (INE). Finalmente, a partir del 2004 el proceso del tratamiento de muestras se realiza en el Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA) a cargo de la Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire de la SEDEMA. Además, con la incorporación de los métodos automáticos para la medición de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$, se redujo el número de estaciones de recolección manual.

Años 2010-actualidad

En el 2012, con el rediseño del SIMAT, la estación Cerro de la Estrella (CES) fue retirada y quedaron 11 sitios. Para el año 2017, con el sismo de septiembre, la estación Coyoacán (COY) quedó deshabilitada, en consecuencia, la red disminuyó a diez sitios y el último cambio ocurrió en 2019, cuando se desmanteló la estación Secretaría de Hacienda (SHA), debido a que dejó de operar desde 2016, por la construcción de un edificio enfrente de la estación que afectaba las mediciones, y con este cambio, sólo quedaron 9 sitios (**Figura 1.2c**). El mapa con la distribución actual de los sitios de monitoreo de la REDMA puede ser consultado en el **Anexo 1** de este informe anual.

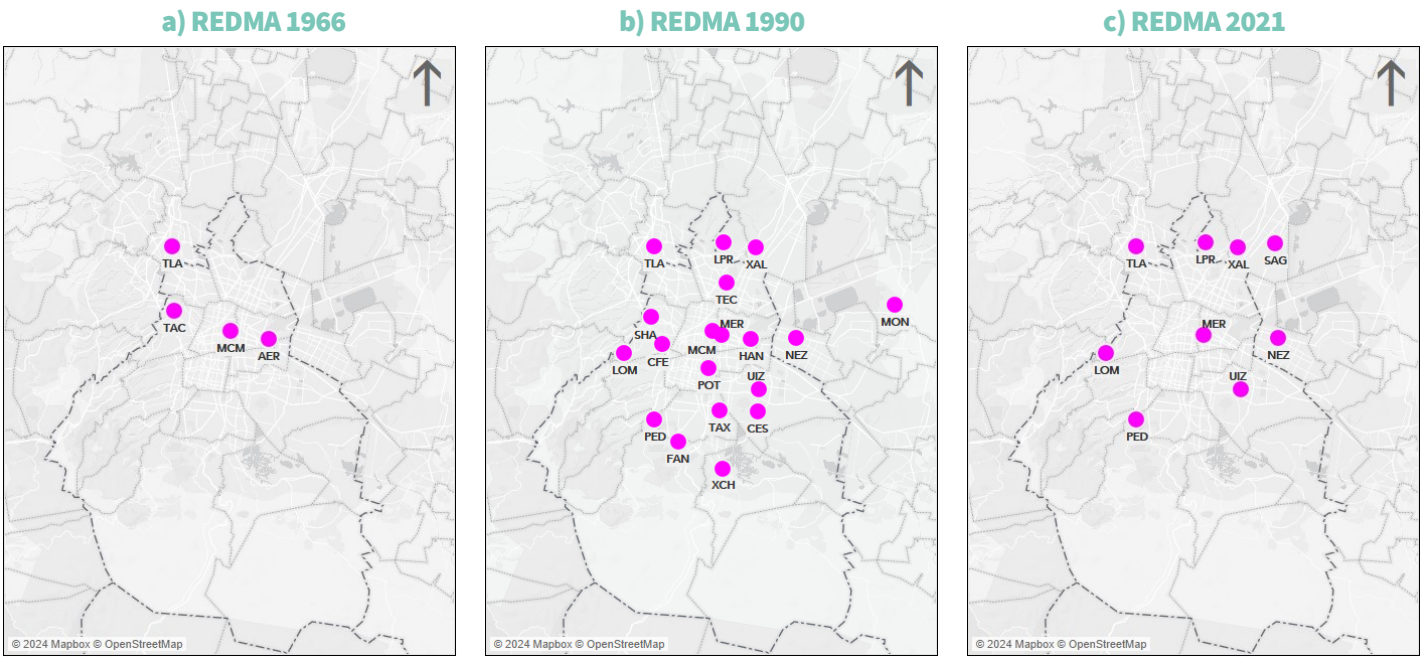


Figura 1.2. Mapas históricos de la Red Manual y los cambios a través de los años

Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA)

La RAMA cuenta con equipos automáticos que brindan información continua en periodos de 1, 5,10,30, 60 minutos o 24 horas. Esta red permite evaluar el estado de la calidad del aire, procesar la información de la concentración de los contaminantes criterio, de los gases: monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2) y ozono (O_3); así como las partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$. Los datos de la RAMA se utilizan para publicar diariamente el índice de calidad del aire (AIRE y SALUD) establecido en la NOM-172-SEMARNAT-2019, para reportar la concentración horaria de los contaminantes durante las 24 horas del día, en todo del año y también se utilizan para evaluar la normatividad ambiental de los gases, así como notificar cuando se alcanzan los valores límite que establece el programa de contingencias ambientales atmosféricas, lo que proporciona información a las autoridades responsables que activan este programa.

Años 1970-1979

En 1974 se crea la "Red Computarizada Automática de Monitoreo Atmosférico del Valle de México" o "Red Phillips", la cual se podría considerar como la antecesora de la RAMA. En ese momento, la red tenía 20 estaciones fijas automáticas, dos unidades móviles y 14 estaciones manuales (Márquez M, E. 1975). Después de tres años de funcionamiento, en 1976 comienza un deterioro de la Red Phillips, ocasionada por falta de refacciones, consumibles y por problemas en la transferencia de datos (Figura 1.3a).

Años 1980-1989

En 1984, se procedió al diseño de una nueva red de monitoreo automático, la cual fue instalada por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), entre 1984 y 1985. Para la implementación de la red, se siguieron los criterios establecidos por la U.S. EPA y la distribución de las estaciones se realizó considerando áreas residenciales, industriales y comerciales, especialmente en instalaciones públicas y oficiales como escuelas, clínicas, entre otros. En octubre de 1986 se inaugura oficialmente la **RAMA**, que monitoreaba SO_2, NO_x, CO, NO_2 y O_3, con un total de 25 estaciones automáticas, una central de cómputo, dos radares sónicos, 16 sitios manuales y 10 estaciones meteorológicas (**Figura 1.3b**). En este mismo año, se presentó el Índice Metropolitano de Calidad del Aire (IMECA) basado en el *Pollutant Standard Index* (PSI de la U.S. EPA).

Años 1990-1999

La RAMA se amplió y reforzó en 1991, debido al crecimiento de la mancha urbana y para tener un mejor conocimiento de la calidad del aire. En 1993, la RAMA fue transferida al Departamento del Distrito Federal (DDF) en la Dirección General de Gestión Ambiental del Aire de la SEDEMA. Para el año 1994, se incrementó la cobertura de la red, de 25 a 32 estaciones y una unidad móvil.

En 1995, comenzó la operación de 10 equipos para monitorear continuamente las PM_{10} con tecnología de balanza oscilante (TEOM) y de atenuación de rayos β (BETA). En 1999 se adquirieron nuevos analizadores de O_3, NO_x y PM_{10}.

Años 2000-2009

En 2001 se llevó a cabo el proyecto "Diseño, instalación y operación de la Red de Monitoreo de $PM_{2.5}$", el cual fue financiado con recursos del Fideicomiso Ambiental Metropolitano y tuvo la colaboración del CENICA, la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) Unidad Xochimilco y el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), coordinado por la Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA. Después de un periodo de pruebas, se seleccionaron 15 sitios, de los cuales en 8 se implementaron equipos automáticos y 7 con equipos manuales. Esta red de partículas quedó formalmente inaugurada en agosto del 2003. En este proyecto se instalaron cuatro nuevas estaciones: Coyoacán (COY), Camarones (CAM), La Perla (PER) y San Juan de Aragón (SJA) que median exclusivamente $PM_{2.5}$, con este cambio, la RAMA aumentó a 34 sitios.

En el año 2007, se instalaron tres estaciones nuevas, esto con la finalidad de alcanzar zonas consideradas de entrada y salida de contaminantes, como es el caso de Acolman (ACO) al noreste de la ZMCM, Chalco (CHO) al sureste y en el centro con Iztacalco (IZT). Por otro lado, como resultado de un estudio realizado entre 2003 y 2006 sobre el diagnóstico de la RAMA, se determinó que algunas estaciones no cumplían con los objetivos de monitoreo para los que fueron instaladas o existía

redundancia en las mediciones de contaminantes, por lo que se retiraron algunos equipos para medir CO y SO_2, así como la estación MIN. Después de estos cambios, la RAMA se incrementó a 35 sitios de monitoreo en total.

Años 2010-actualidad

En 2010, se obtuvieron recursos para el proyecto "Rediseño del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México" y se activó la cuenta del SIMAT en Twitter(@AireMexicodf). Los principales resultados del Rediseño del SIMAT fueron los siguientes:

- Se sacaron de operación 11 estaciones: Tacuba (TAC), Vallejo (VAL), Azcapotzalco (AZC), Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), La Villa (LVI), Aragón (ARA), La Perla (PER), Lagunilla (LAG), Plateros (PLA), Cerro de la Estrella (CES) y Taxqueña (TAX).
- La estación Xalostoc (XAL) se reubicó a 650 m de altura.
- Se reforzaron 20 estaciones: Camarones (CAM), Tultitlán (TLI), Tlalnepantla (TLA), Acolman (ACO), Montecillo (MON), Los Laureles (LLA), La Presa (LPR), Nezahualcóyotl (NEZ), Villa de las Flores (VIF), San Agustín (SAG), Xalostoc (XAL), Merced (MER), Pedregal (PED), Cuajimalpa (CUA), Tláhuac (TAH), UAM Iztapalapa (UIZ) y Chalco (CHO).

En 2012 se realizó el proyecto para instalar una Red de Monitoreo de Hidrocarburos para evaluar la distribución, composición y fuentes de hidrocarburos precursores de O_3 e hidrocarburos tóxicos como el benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX). Los sitios de monitoreo de esta red fueron: Acolman (ACO), Ajusco (AJU), FES Acatlán (FAC), Merced (MER), Pedregal (PED), San Agustín (SAG), UAM Iztapalapa (UIZ) y Xalostoc (XAL). En ese mismo año se reforzó la RAMA con cuatro nuevas estaciones: Cuautitlán (CUT), Hospital General de México (HGM), Santa Fe (SFE) y UAM Xochimilco (UAX). El SIMAT mejoró con la adquisición de dos equipos: un analizador continuo de aerosoles que determina la composición de partículas y un analizador de partículas ultrafinas, para conocer la contribución del tránsito vehicular sobre la formación de partículas.

El 19 de septiembre de 2017, se registró un sismo que afectó a la Ciudad de México y las instalaciones donde se encontraban las estaciones Coyoacán (COY) y San Juan de Aragón (SJA), tuvieron daños importantes, por lo cual fueron removidas y reubicadas. En 2018, se adquirió un Termodesorbedor de Aerosoles Orgánicos acoplado a un cromatógrafo gases-masas (TAG-GC-MS) y se firmó un convenio de colaboración interinstitucional con la UNAM, para que la universidad se encargara de su resguardo y operación con fines de investigación, lo que ha permitido realizar la especiación química horaria de aerosoles orgánicos desde esa fecha.

En 2019 se repusieron e inauguraron las dos estaciones que se removieron en 2017, son FES-Aragón (FAR) ubicada en el municipio de Nezahualcóyotl en el Estado de México y Santiago Acahualtepec (SAC) ubicada en la Alcaldía de Iztapalapa en la CDMX, estas estaciones se ubicaron en áreas que requerían monitoreo para analizar la distribución espacial y el comportamiento de los contaminantes, así como mejorar la cobertura del SIMAT.

Los sitios de la RAMA que todavía continúan en lugar original o cerca de allí, son: FES-Acatlán (FAC), Los Laureles (LLA), La Presa (LPR), Merced (MER), Nezahualcóyotl (NEZ), Pedregal (PED), San Agustín (SAG), Tlalnepantla (TLA), UAM Iztapalapa (UIZ) y Xalostoc (XAL). El mapa de la distribución de la RAMA a detalle se puede consultar en el Anexo 1 de este informe anual o en la Figura 1.3c los 34 sitios que lo conforman.

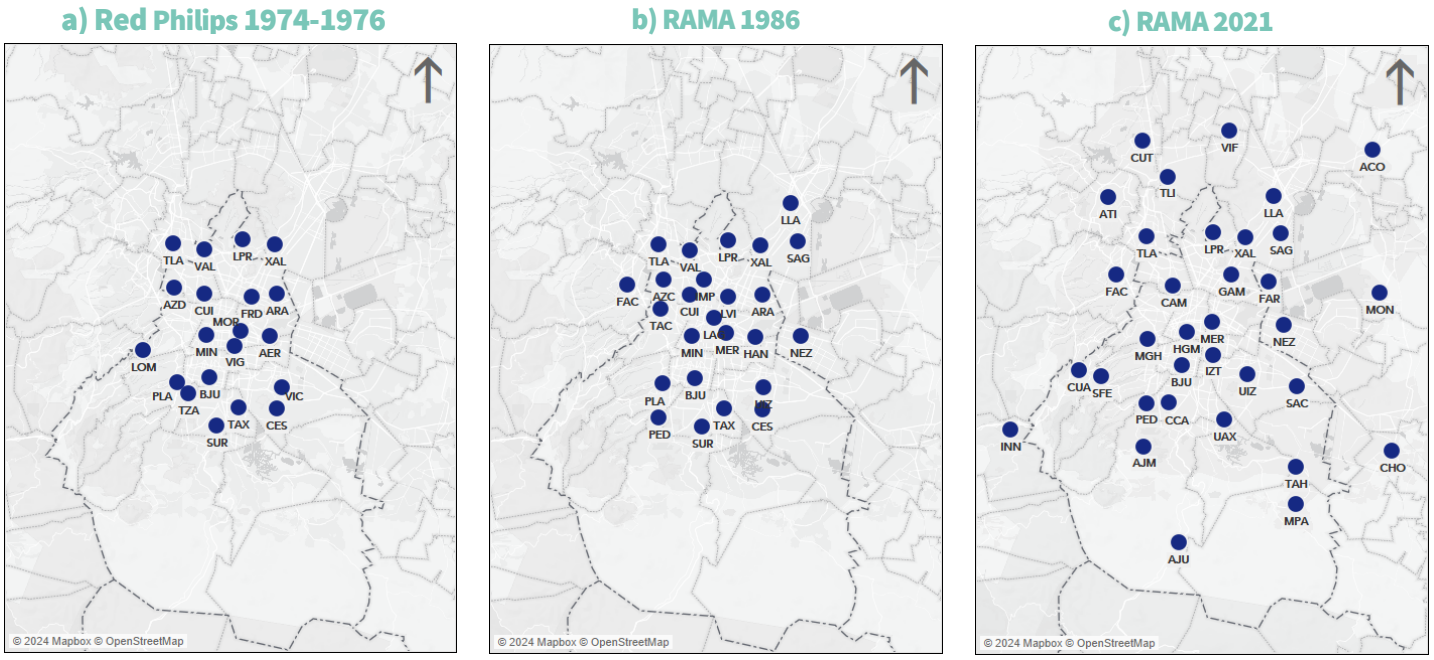


Figura 1.3. Mapas históricos de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) y los cambios a través de los años

Red de Meteorología y radiación solar (REDMET)

La información que proporciona la REDMET permite determinar los parámetros meteorológicos para la vigilancia permanente de las condiciones atmosféricas a nivel superficie y la evaluación de las condiciones de dispersión de los contaminantes, así como para la elaboración del pronóstico de la calidad del aire, se usan en modelos de dispersión de contaminantes y para observar la trayectoria de los contaminantes en la ZMCM.

Años 1970-1979

En 1974, cuando inició la operación de la primera red automática para el monitoreo continúo o "Red Phillips", en las estaciones principales: Merced (MER), Tlalnepantla (TLA), Xalostoc (XAL), San Jerónimo (ahora PED) y Cerro de la estrella (CES) (**Figura 1.4a**), también se complementaron con equipos para medir parámetros meteorológicos que registraban velocidad y dirección del viento, temperatura, así como humedad relativa, por lo que la predecesora de la REDMET comenzó con cinco sitios.

Años 1980-1989

En 1985, se adquirieron dos perfiladores de viento (radares sónicos SODAR), que detectan la velocidad y dirección del viento en la vertical y horizontal de la tropósfera baja, así como el perfil de temperatura vertical. Estos equipos se instalaron en el Congreso de la Unión. En 1986 se adquirieron diez estaciones meteorológicas para medir humedad relativa, temperatura, velocidad y dirección del viento. En octubre de ese año, la REDMET inició operaciones junto con la RAMA (**Figura 1.4b**).

Años 1990-1999

En la década de los 90 no se modificó la estructura de la REDMET y en 1997 se instaló el primer sitio para la medición de radiación tipo A y B, en el Tecnológico de Monterrey campus Estado de México; para febrero de 1998 se comenzó a difundir el índice de radiación ultravioleta con la información generada en dicho sitio. En julio de 1999 comenzó la medición de la radiación UV en ocho estaciones de la REDMET.

Años 2000-2009

Entre el 2000 al 2001, se agregaron 5 torres más y en 2001 ya se contaba con 15 sitios que medían meteorología. En el año 2000 se instaló un sensor para la medición de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) en la estación Tláhuac (TAH) y en 2005 se agregó otro sensor en la estación Cuajimalpa (CUA) (SEDEMA, 2012).

Años 2010-actualidad

En 2012, con el proyecto del rediseño del SIMAT de la Ciudad de México, la REDMET se fortaleció y aumentó a 18 sitios, además se adquirió un perfilador de viento, temperatura y humedad, el cual está conformado por dos equipos: un radar perfilador de viento que utiliza el principio de Doppler para determinar la velocidad y dirección del viento; también tiene un radiómetro que analiza el perfil termodinámico de la atmósfera a partir de la medición de la radiación débil emitida por el oxígeno y el vapor de agua en la región baja de la atmósfera. Este equipo se ubica en la estación Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA) en Vallejo.

En 2014, 2015 y 2016, se reforzó y modificó la REDMET para llegar a 26 sitios, esto debido a que se identificó que había zonas en las que se requería conocer los patrones de viento. En 2016, se instalaron 10 piranómetros para evaluar la radiación solar global en 10 estaciones, como parte de un proyecto de colaboración con el instituto de Geofísica de la UNAM (IG-UNAM), los resultados de estas mediciones se pueden consultar en el Informe Anual de 2016 (SEDEMA, 2017). Por último, en 2019, con la reubicación de las estaciones que se deshabilitaron a causa de terremoto, a los nuevos sitios SAC y FAR, se les instaló una torre meteorológica, por lo que la REDMET incrementó a 28 sitios, los cuales se mantienen actualmente. El mapa de la distribución de la REDMET se puede consultar a detalle en el Anexo 1 de este informe anual y en la Figura 1.4c.

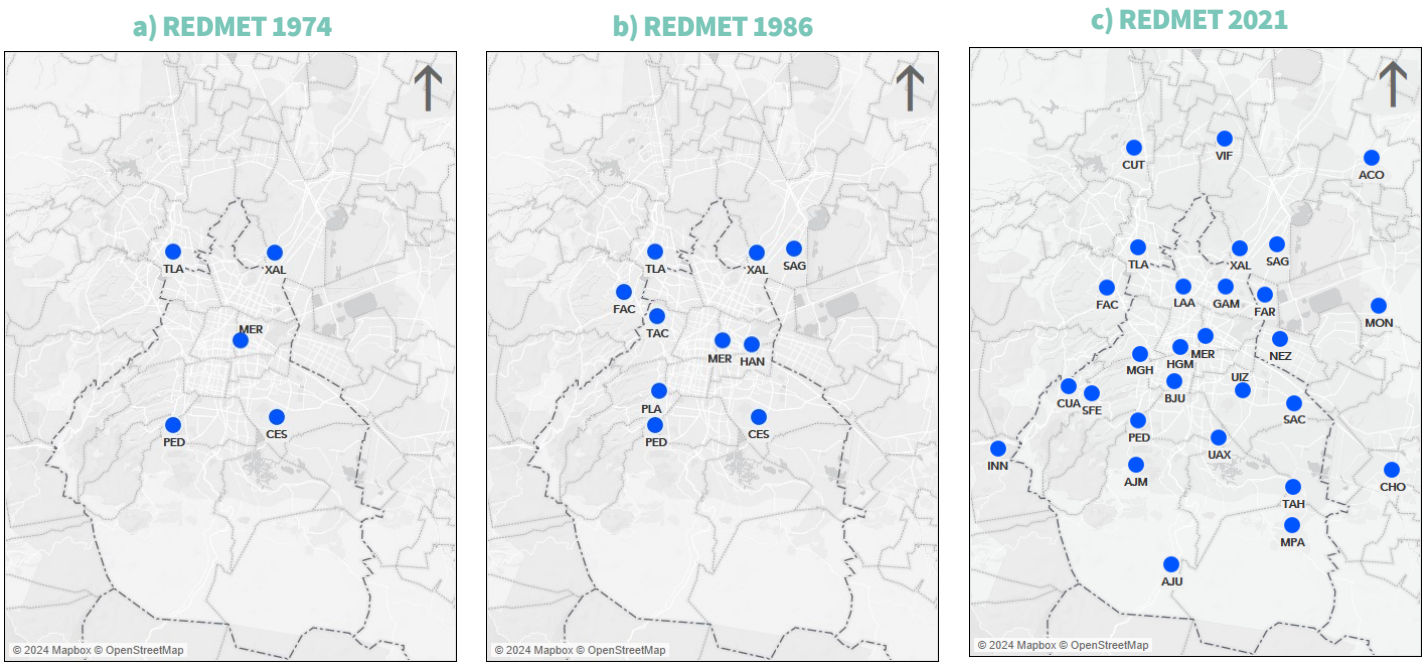


Figura 1.4. Mapas históricos de la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET) y los cambios a través de los años

Red de Depósito Atmosférico (REDDA)

La REDDA se encarga del monitoreo permanente del Depósito Atmosférico en el área urbana, rural y en la zona de conservación ecológica de la Ciudad de México y los municipios conurbados del Estado de México. Esta red tiene la finalidad de medir la distribución temporal y espacial del depósito húmedo y seco, además genera datos de apoyo para analizar la relación entre las emisiones y los mecanismos de transporte de contaminantes, así como proporcionar un método indirecto para la evaluación del impacto de las acciones de prevención y control de la contaminación.

Años 1980-1990

El estudio de las precipitaciones ácidas en la ZMCM tuvo su origen en 1981, cuando Dr. Humberto Bravo del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (actualmente, Instituto de Ciencias de la Atmosfera y Cambio Climático, ICAyCC), realizó muestreos y análisis del agua de lluvia para determinar el potencial hidrógeno (pH), sulfatos y nitratos. En 1983, el M. en I. Armando Báez y Dr. Hugo Padilla, obtuvieron resultados que demostraron la presencia de lluvia ácida en algunos puntos de la ciudad. En 1985, el Dr. Víctor Hugo Páramo, realizó una investigación sobre el fenómeno de lluvia ácida utilizando una red de 10 colectores. En 1987, el Instituto Nacional de Ecología (INE) implementó el Programa “Precipitaciones Ácidas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México”, que tenía el objetivo principal de evaluar la variabilidad y distribución espacial de los parámetros característicos de la precipitación ácida, a través de las técnicas de depósito total, depósito seco y depósito húmedo, así como identificar zonas receptoras al impacto del fenómeno (**Figura 1.5a**).

Años 1990-2000

En 1993, el programa fue transferido a la Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación (**Figura 1.5b**). En el inicio de la red, se contaba con estaciones equipadas con un colector convencional, el cual permitía obtener muestras por medio de la técnica de depósito total. Para 1997, se sustituyeron algunos de los colectores convencionales por automáticos, los cuales permiten separar el depósito atmosférico en sus componentes depósito húmedo y seco. En 1998, con los datos obtenidos y con el análisis del comportamiento del fenómeno de lluvia ácida, se incrementó el número de estaciones a 16, por lo que ya se tenía cobertura en el área rural y de conservación ecológica; además, en este mismo año se instaló un pluviógrafo en cada una de las estaciones de la red.

Años 2000-actualidad

En el año 2000 se terminó de reemplazar los colectores convencionales por automáticos. En el 2001, la red estaba conformada por 16 estaciones, cada una equipada con un colector automático y un pluviógrafo. El programa “Precipitaciones Ácidas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México” dejó de existir para convertirse en la Red de Depósito Atmosférico (REDDA), la cual actualmente conserva los 16 sitios de muestreo. En el año 2003, la Sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (ahora ICAyCC) y la SEDEMA trabajan en conjunto para la determinación de la composición química y características fisicoquímicas de las muestras del depósito húmedo de la REDDA.

En 2013, la SEDEMA adquirió un cromatógrafo de líquidos para identificar la composición electrolítica de las muestras de agua de lluvia y se instaló en el Laboratorio la Sección de Contaminación Ambiental para ser utilizado en los análisis, En 2018 se firmó un convenio de colaboración ICAyCC-SEDEMA para trabajar en conjunto para diversos proyectos, entre los cuales está el de depósito atmosférico. El mapa de la distribución de la REDDA se puede consultar en el Anexo 1 de este informe anual y en la Figura 1.5c.

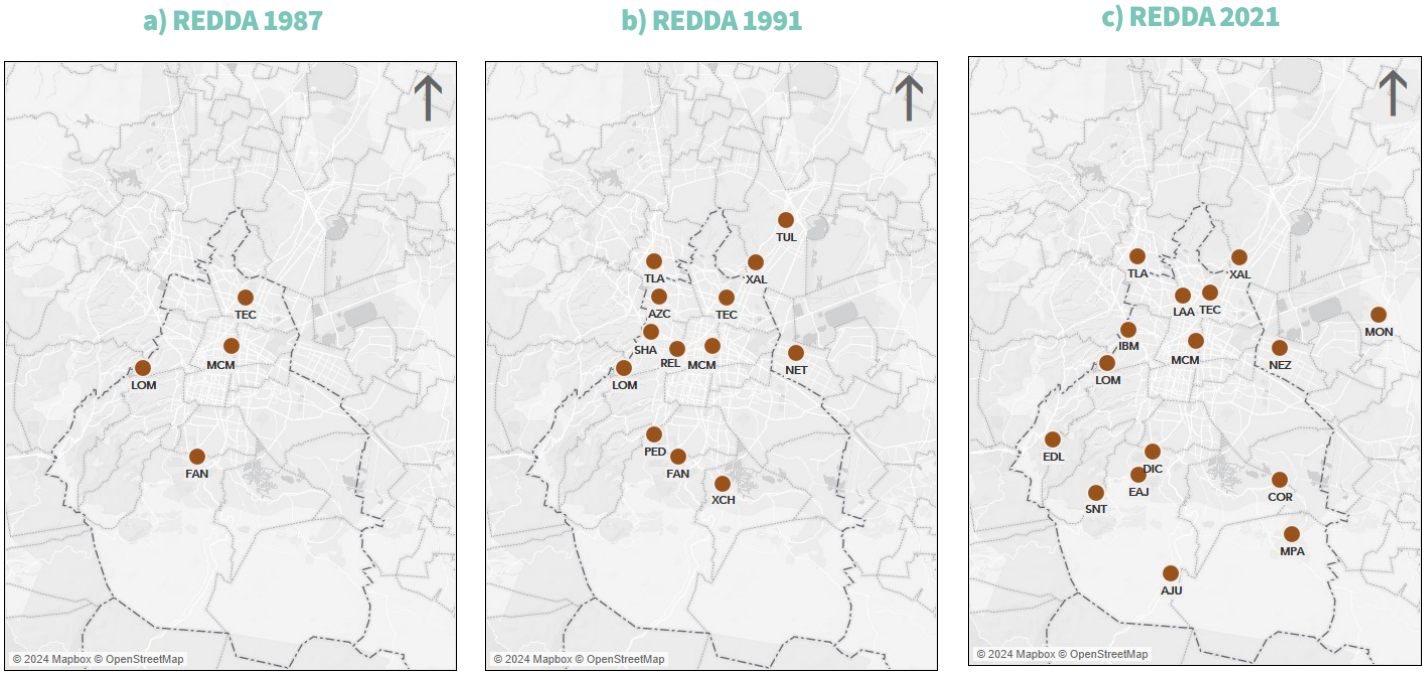


Figura 1.5. Mapas históricos de la Red de Depósito Atmosférico (REDDA) y los cambios a través de los años

Otros componentes del SIMAT

El SIMAT cuenta con un **Laboratorio móvil de monitoreo atmosférico,** que es un importante elemento de apoyo en el análisis de la calidad del aire. Se utiliza para realizar estudios específicos en lugares remotos donde el SIMAT no tiene estaciones fijas para la medición de contaminantes y parámetros meteorológicos. Frecuentemente se usa en la evaluación de la calidad del aire durante eventos que pueden afectar el ambiente, por ejemplo, exhalaciones volcánicas, derrames accidentales, e incendios forestales, entre otras campañas especiales de monitoreo (Figura 1.6).

a) Primera Unidad Móvil 1986

b) Unidad Móvil actual 2021

Figura 1.6. Fotos de la Unidad Móvil y los cambios a través de los años

El **Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA)** se encarga del análisis químico y de la realización de pruebas fisicoquímicas en las muestras obtenidas por la REDMA y la REDDA. El LAA está conformado por otros laboratorios como el de gravimetría, cromatografía, espectrometría y por el **Laboratorio de Estándares**, que fue establecido en 2001, cuenta con patrones certificados para garantizar la trazabilidad de las calibraciones de los equipos de campo, mediante estándares primarios y de transferencia (Figura 1.7).

a) Laboratorio de calibración y Laboratorio de estándares 2000

b) Laboratorio de estándares y laboratorio de Análisis Ambiental 2021

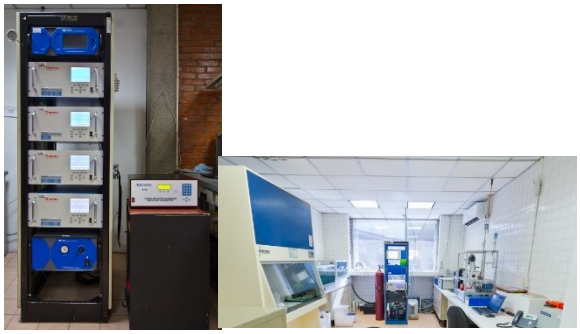


Figura 1.7. Fotos de los Laboratorios de estándares y análisis ambiental y los cambios a través de los años

La información que se genera en los subsistemas RAMA y REDMET del SIMAT, se concentra en el **Centro de Información de la Calidad del Aire (CICA),** donde cada minuto se obtienen registros de los contaminantes atmosféricos y parámetros meteorológicos provenientes de los analizadores automáticos, los cuales cada hora se verifican y validan para calcular los promedios horarios, que se utilizan para generar el Índice AIRE y SALUD (NOM-172-SEMARNAT-2019), así como el Índice de radiación solar ultravioleta (IUV). Cada hora, estos índices se publican en las páginas electrónicas de la SEDEMA y del SIMAT, se comunican vía telefónica, por medio del IAyStel, en Twitter, así como en la App AIRE. El CICA vigila la calidad del aire para notificar oportunamente la ocurrencia de episodios de incrementos extraordinarios de PM_{10} y SO_2, además notifica a la población sobre la activación/desactivación de las Contingencias Ambientales Atmosféricas cuando la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAMe) lo determina (**Figura 1.8**).

a) CICA 2003 **b) CICA 2009** **c) CICA 2021**

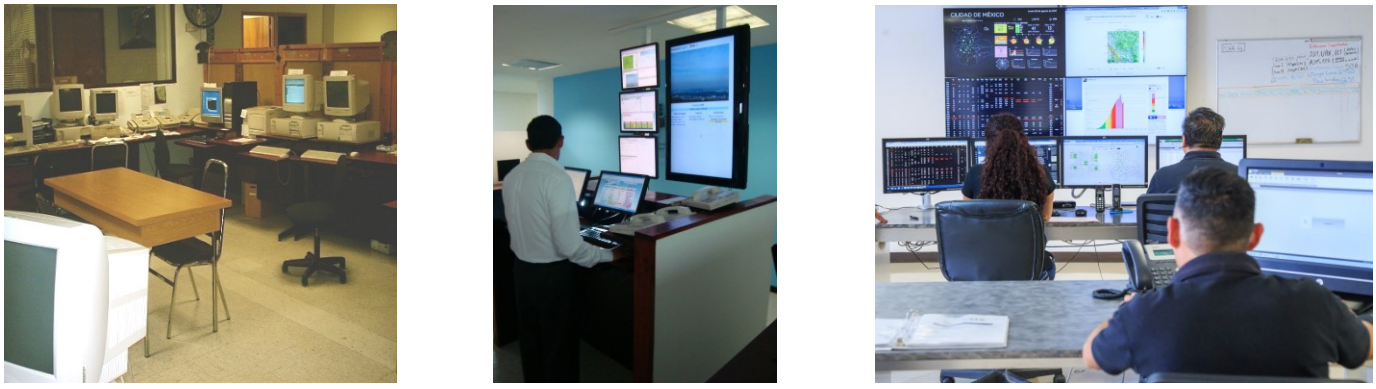


Figura 1.8. Fotos del centro de Información de Calidad del Aire (CICA) y los cambios a través de los años

Por último, el **Centro de Datos**, es una parte esencial del soporte a la operación del SIMAT para la adquisición de datos, ya que en este centro se realiza el poleo minutal a las estaciones de monitoreo integradas en la RAMA y REDMET, con redes basadas en TCP/IP con enlaces VPN en Internet. La red de datos consta de un servicio de Internet, el cual se administra y comparte entre los usuarios con un servidor proxy, como subred, se anexan al dominio “ambiente” para la administración del equipo de cómputo y usuarios (**Figura 1.9**). En este Centro de datos, se implementó el modelo operacional de calidad del aire en la CDMX (Air Quality Forecast System, AQFS-MexDF), en un clúster (High Performance Computing-HPC), el cual inició su operación desde febrero del 2017. Los pronósticos de calidad del aire y meteorología del AQFS-MexDF han sido una herramienta útil para la toma de decisiones sobre las condiciones de calidad del aire para el día actual y el siguiente, así como para elaborar diversos análisis y escenarios de reducción de emisiones.

a) Centro de Cómputo 2003

b) Centro de datos 2021

Figura 1.9. Fotos del centro de datos y los cambios a través de los años

En la Figura 1.10 se presenta el conjunto de subredes y componentes que actualmente conforman el SIMAT y que fueron descritos anteriormente.

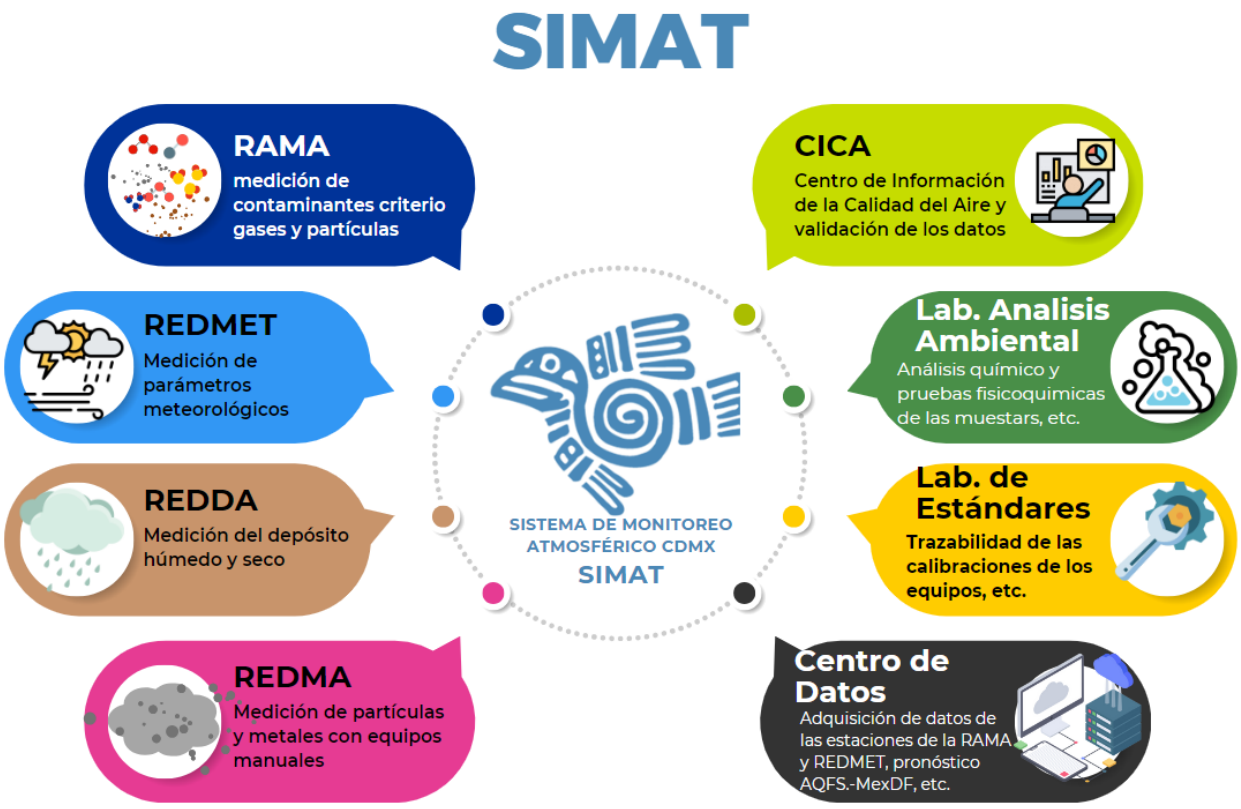


Figura 1.10. Componentes que forman el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT)

CAPÍTULO 2

Cumplimiento de la Normatividad

Las normas de calidad del aire son herramientas que especifican criterios para evaluar el estado de la contaminación atmosférica. Un estándar o norma de calidad del aire establece la cantidad máxima de un contaminante promediado en un periodo definido, que funciona como límite necesario para reducir daños en la salud pública y este umbral define el aire limpio (CARB, 2023). Existen diversos valores límite a nivel mundial, como son las guías de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y los estándares nacionales de calidad del aire ambiente (NAAQS, por sus siglas en inglés) establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (U.S. EPA).

Las guías de la OMS se actualizaron en 2021 con nuevos límites e indicadores (**Tabla 2.1**), estas modificaciones son el resultado de la revisión sistemática de estudios epidemiológicos publicados después de las guías de calidad del aire 2005 (OMS, 2006), ya que hubo un incremento notable de estudios y evidencia sobre los efectos dañinos de la contaminación, derivados de los avances en el monitoreo atmosférico y en la evaluación de la exposición, así como del aumento de la base de datos mundial. En diversos estudios epidemiológicos en países de ingresos bajos a medios, se documentaron efectos adversos causados por contaminación elevada, mientras que, en países de ingresos altos y aire relativamente más limpio, se registraron efectos dañinos a concentraciones menores a lo que se había estudiado. Es importante mencionar que la OMS indica que sus directrices no son normas jurídicamente obligatorias y son una herramienta basada en evidencia que se puede usar como una guía para la elaboración de los estándares de cada país. El objetivo principal de las directrices de la OMS es proporcionar orientación para conocer los efectos de la contaminación del aire y disminuir los riesgos en salud que ocasiona en todo el mundo.

En la actualización de la OMS en 2021 (**Figura 2.1**), para el SO_2 se incrementó su valor guía, mientras que para NO_2 (1h), O_3 (8h) y CO (8h), se mantuvieron en el mismo nivel que en 2005; sin embargo, es importante mencionar que el indicador cambió para ozono, ya que en 2021 se considera el percentil 99 (**P99**) de los máximos diarios del promedio móvil de 8 horas. De manera similar, en los indicadores de 24 horas de SO_2, NO_2 y CO se utiliza el P99, esto difiere con lo establecido en las guías de la OMS del 2005. En 2021, también se modificaron las metas intermedias, las cuales son valores de concentración superiores a las guías y están diseñadas para que las autoridades de zonas muy contaminadas, las utilicen para elaborar políticas de reducción gradual de emisiones y que se puedan cumplir en plazos realistas (OMS, 2021).

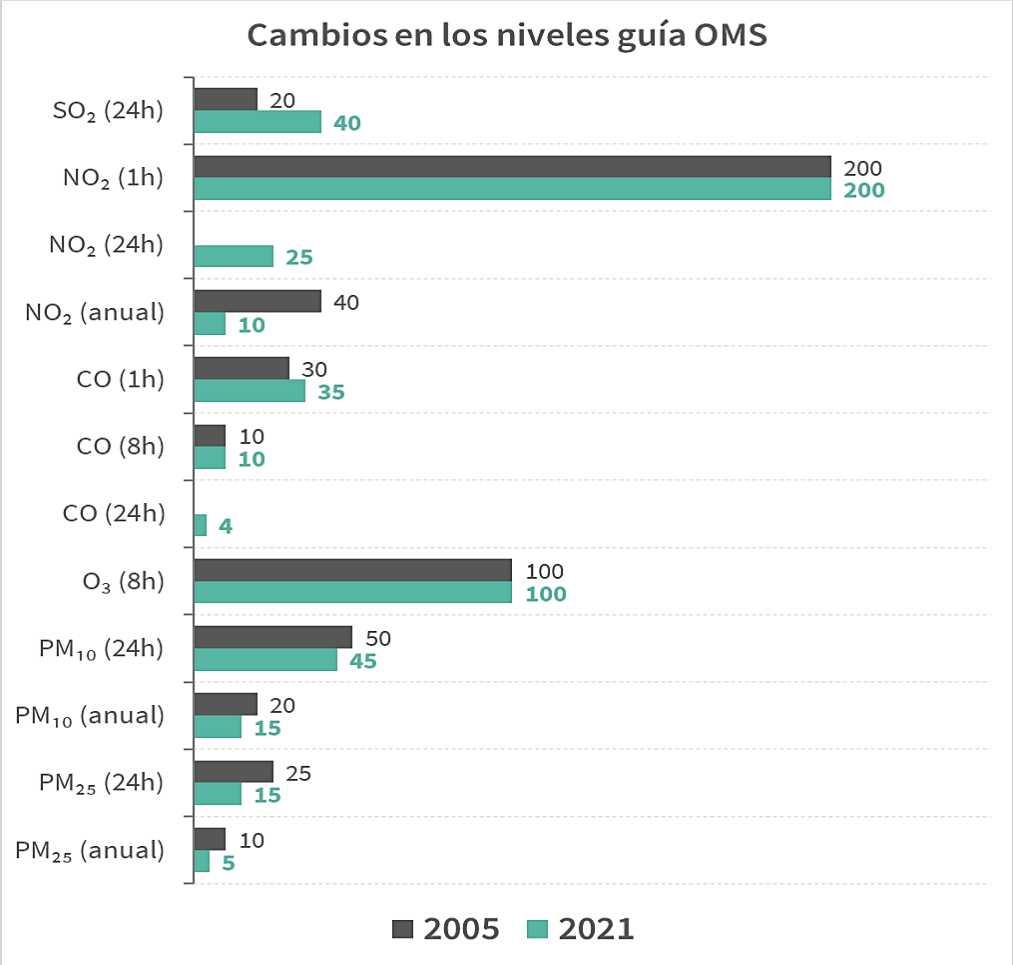


Figura 2.1. Actualización de valores guía de la OMS (en µg/m^3) y su comparación con 2005.

Tabla 2.1. Nuevos valores en las guías de calidad del aire (OMS, 2021) y su conversión a ppb o ppm

Contaminante	Indicador	OMS (µg/m^3)	Conversión**
SO_2	24 horas*	40	19 ppb
NO_2	1 hora	200	134 ppb
	24 horas*	25	17 ppb
	Anual	10	7 ppb
CO	1 hora	35,000	38.63 ppm
	8 horas	10,000	11.04 ppm
	24 horas*	4,000	4.42 ppm
O_3	8 horas*	100	64 ppb
PM_{10}	24 horas*	45	
	Anual	15	
$PM_{2.5}$	24 horas	15	
	Anual*	5	

*Percentil 99

**La conversión a ppb o ppm se hizo con 585 mmHg y 17 °C

En México, se tienen las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de Salud Ambiental que establecen los límites para los diferentes contaminantes atmosféricos (Tabla 2.2): dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2), monóxido de carbono (CO), ozono (O_3), partículas con diámetro menor a 10 y 2.5 µm (PM_{10} y $PM_{2.5}$). Las NOM son de aplicación obligatoria a nivel nacional, por lo que se realiza la evaluación anual de los niveles de contaminantes en las estaciones que se encuentran en la Ciudad de México (CDMX) y en los 26 municipios conurbados del Estado de México (EDOMEX), que conforman la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM)[1].

En este capítulo se presentan los niveles máximos de concentración que se obtuvieron durante 2021 en la ZMCM y dividido por entidad, así como su cumplimiento con las NOM (Tabla 2.2), con las nuevas guías de calidad del aire de la OMS de 2021 (Tabla 2.1), y con los estándares de la U.S. EPA. Es importante mencionar que en el Anexo IV de este informe se pueden consultar los datos completos para los indicadores de las NOM que se registraron en todas las estaciones de monitoreo durante 2021.

Tabla 2.2. Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de Salud Ambiental vigentes en 2021.

CONTAMINANTE	NOM VIGENTE	ESPECIFICACIONES	ÚLTIMA ACTUALIZACIÓN
Ozono (O_3)	NOM-020-SSA1-2014	**95 ppb** Promedio de 1 h **70 ppb** Promedio móvil de 8 h	19/Agosto/2014
Monóxido de carbono (CO)	NOM-021-SSA1-1993	**11 ppm** Promedio móvil de 8 h	23/Diciembre/1994
Dióxido de azufre (SO_2)	NOM-022-SSA1-2019	**75 ppb** Promedio trianual del P99 del máximo de 1 h **40 ppb** Máximo trianual del promedio de 24 h	20/Agosto/2019
Dióxido de nitrógeno (NO_2)	NOM-023-SSA1-1993	**210 ppb** Promedio de 1 h	23/Diciembre/1994
Partículas menores a 10 micrómetros (PM_{10})	NOM-025-SSA1-2014	**75 µg/m³** Promedio de 24 h **40 µg/m³** Promedio anual	20/Agosto/2014
Partículas menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$)		**45 µg/m³** Promedio de 24 h **12 µg/m³** Promedio anual	

[1] La ZMCM es la zona que comprende el área total de representatividad de las estaciones de monitoreo

En la **Figura 2.2** se presenta un resumen del cumplimiento de los límites de las NOM, los valores guía OMS y de los estándares NAAQS de la U.S. EPA, desglosado por entidad: CDMX y EDOMEX. Para determinar el cumplimiento de los límites, se consideran todos los indicadores establecidos en cada estándar o guía, por ejemplo, solamente se considera que un contaminante cumple con la NOM si no supera ningún límite establecido en esta, de manera similar se consideró para los estándares internacionales de la OMS y U.S. EPA.

En 2021, la CDMX cumplió con ambos límites de la NOM de SO_2, pero el EDOMEX no; este comportamiento es similar para el estándar de la U.S. EPA y en el caso del umbral de la OMS, ninguna entidad cumplió el nuevo valor guía. En los contaminantes NO_2 y CO, sus niveles máximos en ambas entidades fueron menores a los límites de la NOM y de la U.S. EPA; mientras que para los valores guía de la OMS, el CO registró concentraciones que cumplieron con los límites, por el contrario, NO_2 tuvo niveles máximos que superaron las guías. En el caso de PM_{10}, solamente se cumplieron los estándares de la U.S. EPA en ambas entidades; finalmente, los niveles de $PM_{2.5}$ y O_3, superaron todos los estándares nacionales e internacionales.

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

Figura 2.2. Resumen del cumplimiento de los límites establecidos por las NOM, OMS y U.S. EPA durante 2021 para CDMX y EDOMEX.

DIÓXIDO DE AZUFRE (SO_2)

El dióxido de azufre (SO_2) tiene diversas fuentes antropogénicas como refinerías, centrales eléctricas y algunas industrias, también existen fuentes naturales como las emisiones volcánicas. En términos de salud, la exposición al SO_2 puede ocasionar efectos inmediatos como irritación en ojos, nariz y garganta, síntomas respiratorios como inflamación pulmonar, tos, sibilancias, dificultad para respirar y opresión en el pecho. La exposición a niveles muy altos (>1 ppm) puede provocar mayor incidencia de síntomas, padecimientos y mortalidad pulmonar (CARB, 2023). Los grupos más susceptibles a este contaminante son los adultos mayores, personas con enfermedades pulmonares o cardiovasculares crónicas, niños, en personas asmáticas se exacerban sus síntomas respiratorios y tienen un mayor riesgo de ingresar al hospital (Figura 2.3).

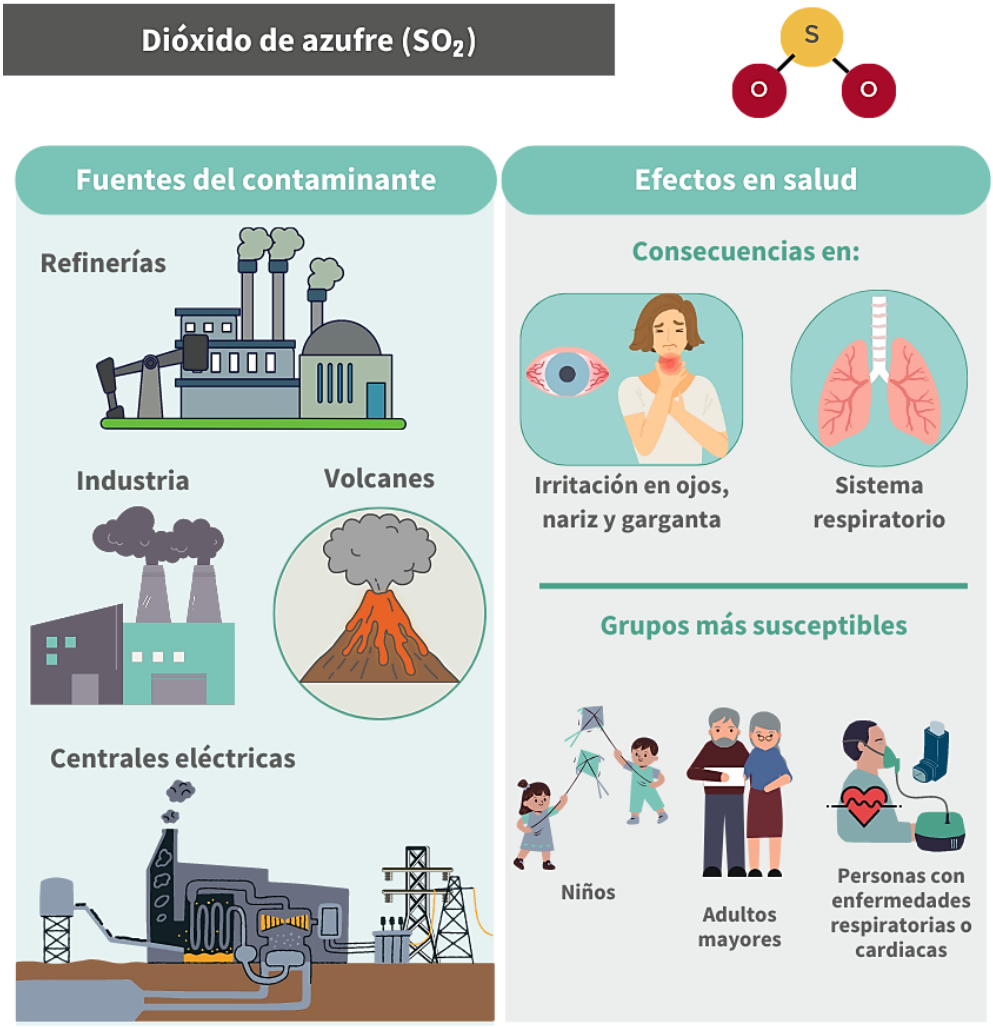


Figura 2.3. Principales fuentes de emisión y efectos en salud del SO_2, elaboración propia.

EVALUACIÓN DE LA NOM

La NOM-022-SSA1-2019 establece dos indicadores y valores límite para el SO_2: 75 ppb (máximo de 1 h) y 40 ppb (24 h). Esta NOM tiene lineamientos estrictos de suficiencia de datos, los cuales se deben cumplir en las estaciones para poder evaluarlas y durante 2021, solamente dos sitios del EDOMEX tuvieron la suficiencia de información establecida en la NOM, mientras que en la CDMX fueron siete estaciones, por lo que en esta evaluación solamente se consideraron los valores máximos de los 9 sitios que sí tuvieron suficiencia; sin embargo, los datos completos por estación se pueden consultar en el Anexo IV de este informe.

En la Tabla 2.3 se presentan los máximos por ZMCM y por cada entidad que la conforma. Para la NOM-022-SSA1-2019, la CDMX cumplió con ambos límites, con un máximo de 67 ppb en el indicador de 1 hora y 30 ppb en la métrica de 24 horas; pero en el EDOMEX, se registró un máximo de 102 ppb (1 hora) y 43 ppb (24 horas), los cuales superaron ambos límites normados, en consecuencia, no cumple con la NOM durante 2021. En términos internacionales, la nueva guía de la OMS para SO_2 tiene una concentración superior a la establecida en 2005; sin embargo, se superó en ambas entidades de la ZMCM. En el caso de los estándares NAAQS de la U.S. EPA, el máximo registrado en la CDMX cumplió con el límite, por el contrario, en el EDOMEX se superó el umbral establecido por la U.S. EPA. Los valores más altos de SO_2 fueron en EDOMEX debido a la trayectoria de los vientos y a su cercanía con fuentes externas del contaminante, como es la refinería en Tula, Hidalgo. Los valores mínimos de los indicadores evaluados fueron en el sur y suroeste de la ZMCM.

Tabla 2.3. 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/m^3	75 ppb
ZMCM	102 ppb	43 ppb	62 µg/m^3	102 ppb
CDMX	67 ppb	30 ppb	52 µg/m^3	67 ppb
EDOMEX	102 ppb	43 ppb	62 µg/m^3	102 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 la Figura 2.4 se presentan los valores por estación de monitoreo, donde se puede observar que el valor más alto, en la CDMX fue para Merced (MER) con 67 ppb (1 hora) y 30 ppb (24 horas), mientras que en el EDOMEX fue en Tlalnepantla (TLA) con 102 ppb (1 hora) y 43 ppb (24 horas). En el indicador de la OMS, los máximos fueron en CAM (52 µg/m^3 = 25 ppb, a 17°C y 585 mmHg) para la CDMX y en TLA (62 µg/m^3 = 30 ppb, a 17°C y 585 mmHg) para EDOMEX. En los límites NAAQS de la U.S. EPA, se usan los mismos criterios de suficiencia e indicador de 1 hora que en la NOM, por lo que los valores máximos son iguales a la normatividad nacional.

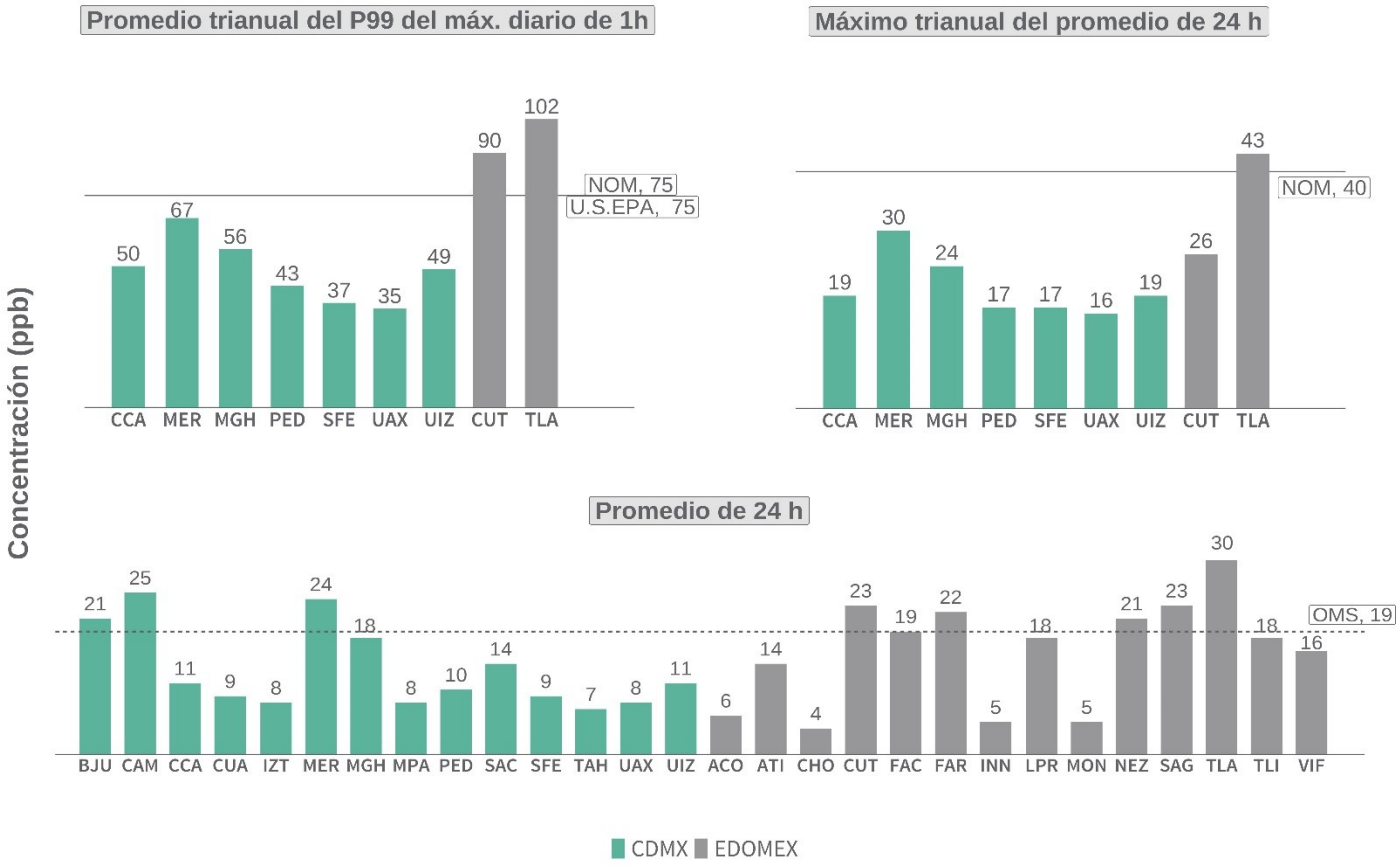


Figura 2.4. Concentración máxima de SO_2 con respecto a los indicadores y límites de la NOM-022-SSA1-2019, OMS (convertido a ppb con 17°C, 585 mmHg) y NAAQS de la U.S. EPA, por estación de monitoreo.

DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO_2)

En el dióxido de nitrógeno (NO_2), su principal origen es el transporte, de acuerdo con el Inventario de emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2020 (SEDEMA, 2023), las fuentes móviles contribuyen con casi el 84 % de óxidos de nitrógeno (NOx), además hay fuentes naturales como las tormentas eléctricas. La exposición al NO_2 daña la salud, en el corto plazo causa inflamación de vías respiratorias, función pulmonar reducida, tos, sibilancias y exacerbación del asma, así como un mayor riesgo de admisión hospitalaria asociada con este padecimiento. La exposición constante causa efectos a largo plazo y existe evidencia que relaciona el NO_2 con incidencia de asma pediátrico, riesgo de mortalidad prematura especialmente en padecimientos respiratorios como la Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica (EPOC) e infección aguda de vías respiratorias inferiores (Huangfu & Atkinson, 2020). Los grupos más susceptibles son personas asmáticas, adultos mayores, niños, personas con enfermedades crónicas respiratorias o cardíacas (Figura 2.5).

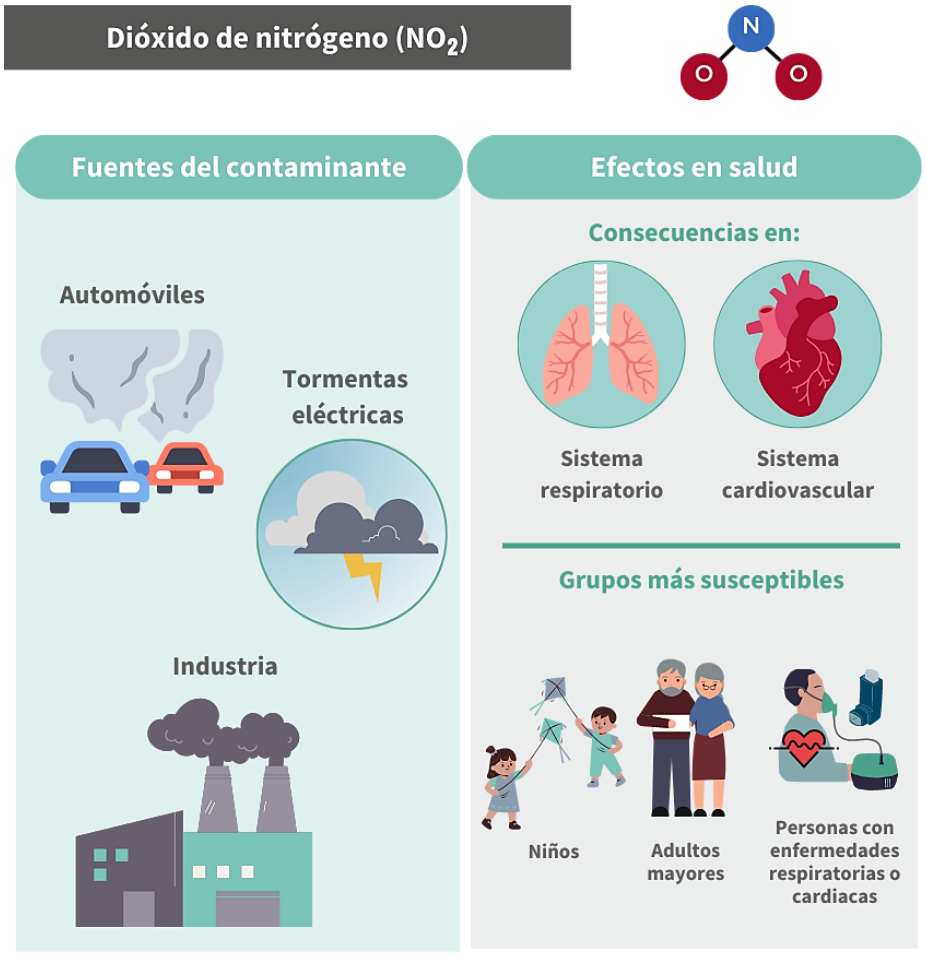


Figura 2.5. Principales fuentes de emisión y efectos en salud del NO_2.

EVALUACIÓN DE LA NOM

La NOM-023-SSA1-1993 establece un valor límite de 210 ppb para el promedio horario de NO_2, el cual no debe ser superado más de una vez al año. En la ZMCM, esta NOM se ha cumplido desde el 2006 y en la Tabla 2.4 se puede observar que para 2021, tampoco se superó ya que el máximo horario en CDMX fue 132 ppb y en EDOMEX 116 ppb. Los valores más altos de NO_2 se presentaron en estaciones del centro y norte de la ZMCM debido a las vialidades, así como a la carga vehicular en dichas zonas, este patrón ha sido constante a través de los años.

Para las nuevas guías de la OMS, el límite del promedio horario se cumplió en ambas entidades con el máximo en la CDMX, en la métrica de 24 horas se obtuvieron máximos superiores a la guía, en CDMX fue 79 µg/m^3 (53 ppb, a 17°C y 585 mmHg), mientras que para EDOMEX el máximo fue 71 µg/m^3 (48 ppb, a 17°C y 585 mmHg). El umbral para el promedio anual de la OMS se rebasó en ambas entidades, con el valor más alto en CDMX (43 µg/m^3 = 29 ppb, a 17°C y 585 mmHg); sin embargo, el de EDOMEX fue muy similar (42 µg/m^3 = 28 ppb, a 17°C y 585 mmHg). Los indicadores de la U.S. EPA, 1 hora y anual, se cumplen en CDMX y EDOMEX, con diferencias mínimas entre entidades.

Tabla 2.4. Valores de concentración máxima de NO_2 con respecto a los indicadores y límites de la NOM-023-SSA1-1993, OMS y NAAQS de la U.S. EPA.

Entidad	NOM	OMS			U.S. EPA	
	No exceder máx. 1h	Máximo 1h	P99 del promedio 24h	Promedio anual	Promedio trianual del P98 del máx. 1h	Promedio anual
	210 ppb	200 µg/m^3	25 µg/m^3	10 µg/m^3	100 ppb	53 ppb
ZMCM	0 horas	196 µg/m^3	79 µg/m^3	43 µg/m^3	71 ppb	29 ppb
CDMX	0 horas	196 µg/m^3	79 µg/m^3	43 µg/m^3	71 ppb	29 ppb
EDOMEX	0 horas	173 µg/m^3	71 µg/m^3	42 µg/m^3	70 ppb	28 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.

A nivel estación (Figura 2.6), se observa que, para el promedio horario, los máximos se presentaron en los sitios del centro de la CDMX, MER y Benito Juárez (BJU) con 132 y 130 ppb, respectivamente; mientras que los mínimos se fueron en el sur y suroeste de la ZMCM, en estaciones como Tláhuac (TAH), Pedregal (PED) y Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA). En el EDOMEX, el máximo horario fue 116 ppb en FES Acatlán (FAC) y el mínimo se registró en Montecillos (MON) con 68 ppb. El indicador de 24 horas de la OMS obtuvo su máximo en Camarones (CAM) con 52 ppb (77 µg/m^3) para la CDMX y para EDOMEX, fue en la estación TLA con 48 ppb (71 µg/m^3). Los indicadores anuales de la OMS y U.S. EPA tuvieron sus máximos en el centro y norte de la CDMX, en sitios como MER y CAM, mientras que en el EDOMEX fueron en las estaciones TLA, FAC y Nezahualcóyotl (NEZ). Finalmente, el indicador trianual de 1 h de la U.S. EPA, tuvo sus máximos en los sitios MER, UIZ y CAM en CDMX, para el EDOMEX fueron en FAC, TLA y Tultitlán (TLI).

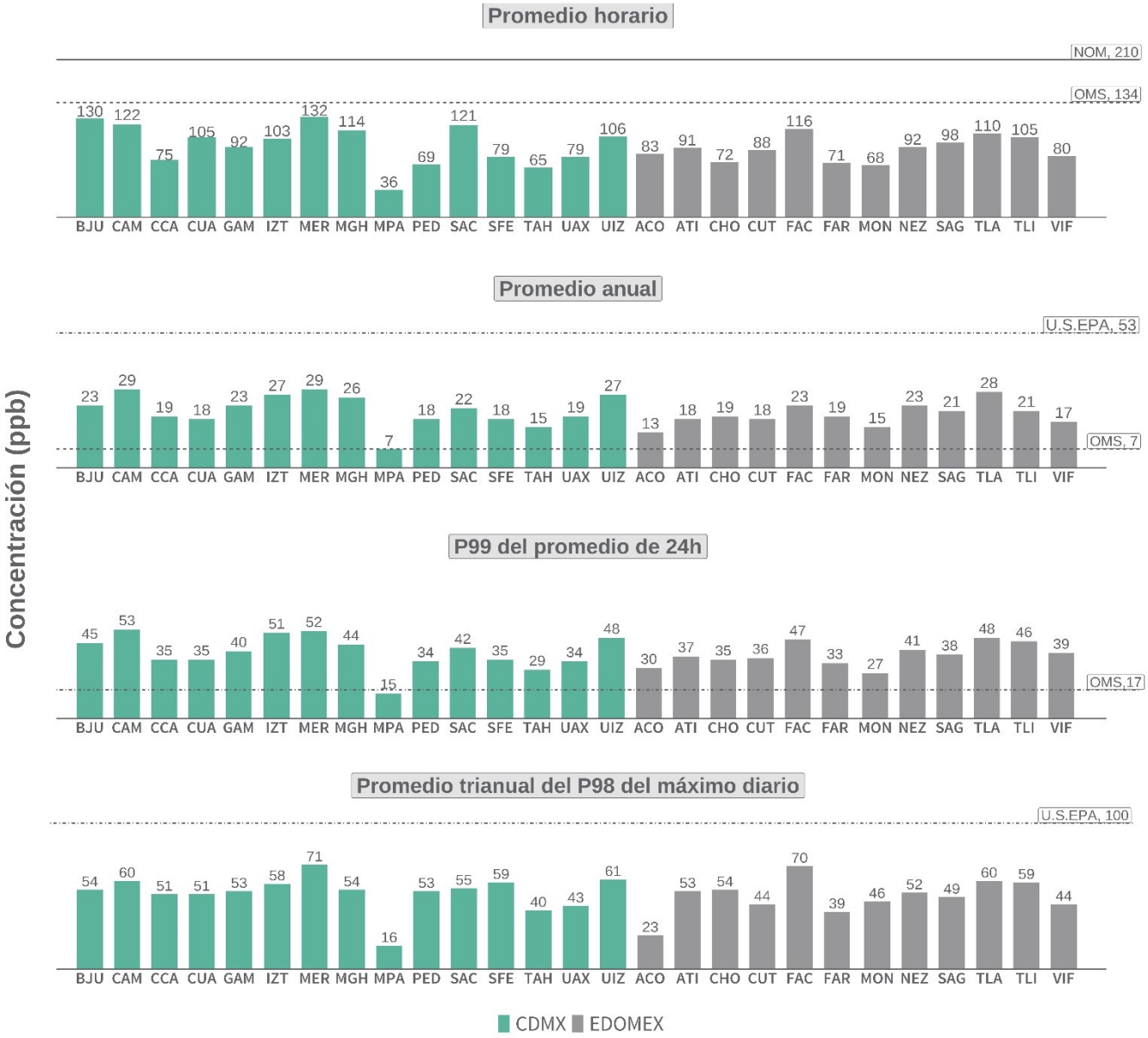


Figura 2.6. Concentración máxima de NO_2 con respecto a los indicadores y límites de la NOM-023-SSA1-1993, OMS (convertido a ppb con 17°C, 585 mmHg) y NAAQS de la U.S. EPA, por estación de monitoreo.

MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

El monóxido de carbono (CO) es un gas que se emite a partir de la quema incompleta de combustibles fósiles y de acuerdo con el inventario de emisiones del 2020 (SEDEMA, 2023), los vehículos contribuyen con más del 95 % del CO total en la Zona Metropolitana del Valle de México.

El CO tiene efectos importantes en la salud, ya que se propaga en el torrente sanguíneo, se une a la hemoglobina en la sangre y reduce su capacidad para transportar oxígeno, en consecuencia, daña los tejidos, células y órganos. Los síntomas inmediatos de la exposición al CO son: dolor de cabeza, dificultad para respirar, confusión, fatiga y mareos debido al reducido suministro de oxígeno hacia el cerebro. El CO puede atravesar la placenta para acceder a la circulación fetal y al cerebro en desarrollo (Levy, 2015), por lo que es un contaminante que afecta directamente a los bebés por nacer. Otros grupos de población susceptibles al CO son los adultos mayores, así como personas con padecimientos como anemia y con antecedentes de enfermedades cardíacas o respiratorias (Figura 2.7). Las personas con enfermedades cardiovasculares son un grupo en riesgo ya que el CO reduce su capacidad para responder a mayores demandas de oxígeno durante el esfuerzo físico y el estrés, este bajo suministro de oxígeno al músculo cardíaco provoca dolor en el pecho (CARB, 2023).

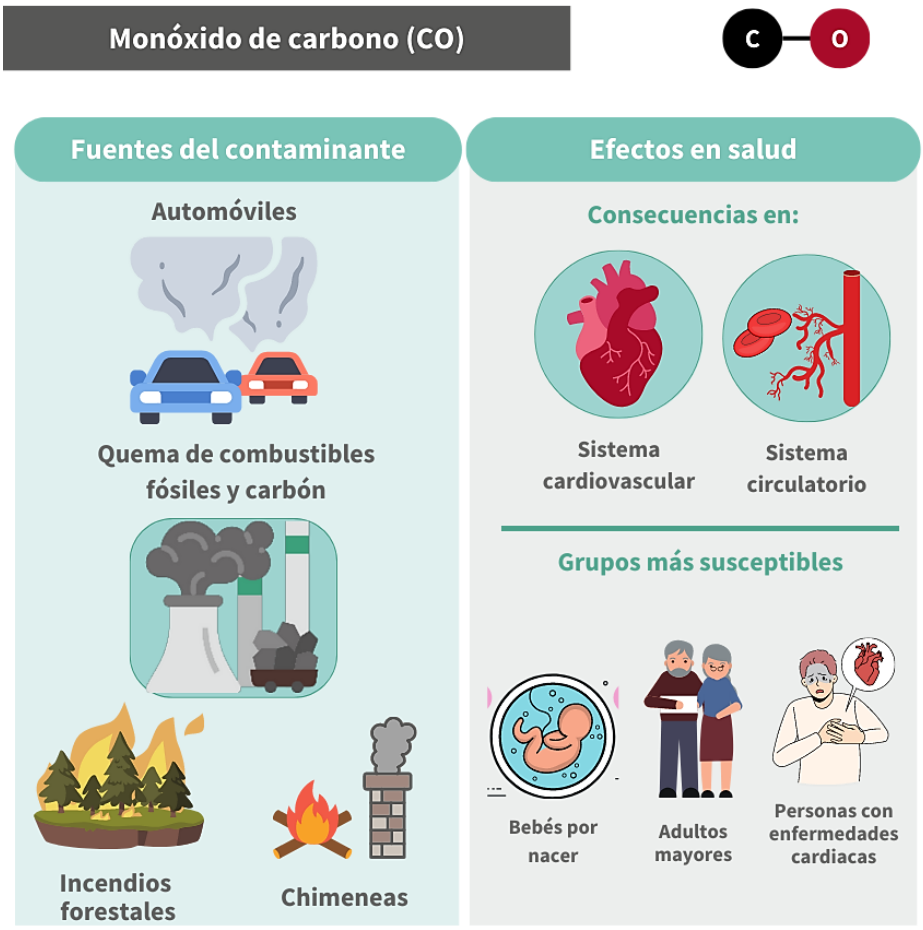


Figura 2.7. Principales fuentes de emisión y efectos en salud del CO.

EVALUACIÓN DE LA NOM

La NOM-021-SSA1-1993 establece un valor límite de 11 ppm para el máximo del promedio móvil de 8 horas de CO. En la ZMCM, esta NOM se ha cumplido desde 2001 con valores menores al límite y es el resultado de la implementación de estrategias de reducción de emisiones en fuentes móviles. En la Tabla 2.5 se presentan los valores máximos registrados durante 2021 para los indicadores evaluados, donde se puede observar que todos los límites nacionales e internacionales se cumplieron en ambas entidades de la ZMCM, además los valores máximos son muy similares entre CDMX y EDOMEX.

Tabla 2.5. Valores de concentración máxima de CO con respecto a los indicadores y límites de la NOM-021-SSA1-1993, OMS y NAAQS de la U.S. EPA.

Entidad	NOM	OMS			U.S. EPA	
	Promedio móvil 8h	Promedio 1h	Promedio móvil 8h	P99 del promedio 24h	Promedio 1h	Promedio móvil 8h
	11 ppm	35 000 µg/m³	10 000 µg/m³	4 000 µg/m³	35 ppm	9 ppm
ZMCM	2.6 ppm	4,075 µg/m³	2,355 µg/m³	1,250 µg/m³	4.5 ppm	2.6 ppm
CDMX	2.6 ppm	3,985 µg/m³	2,355 µg/m³	1,250 µg/m³	4.4 ppm	2.6 ppm
EDOMEX	2.6 ppm	4,075 µg/m³	2,355 µg/m³	1,214 µg/m³	4.5 ppm	2.6 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.

En el análisis por estación (Figura 2.8) para el indicador del promedio móvil de 8 horas (NOM, OMS y U.S. EPA), los valores más altos en la CDMX fueron en los sitios Santiago Acahualtepec (SAC) y MER con 2.6 ppm (2,355 µg/m³) y 2.3 ppm (2,083 µg/m³), respectivamente. Mientras que en el EDOMEX fueron en las estaciones La Presa (LPR) con 2.6 ppm (2,355 µg/m³) y NEZ con 2.4 ppm (2,173 µg/m³).

En los indicadores de 1 hora de la OMS y U.S. EPA, los valores más altos en EDOMEX se registraron en las estaciones NEZ con 4.5 ppm (4,075 µg/m³), seguida de Chalco (CHO) con 3.9 ppm (3,532 µg/m³); en la CDMX los máximos se presentaron en SAC (4.4 ppm = 3,985 µg/m³) y en Iztacalco (IZT) con 3.8 ppm (3,441 µg/m³).

Finalmente, el nuevo indicador de la OMS, el percentil 99 (P99) del promedio de 24 horas, los valores más altos en CDMX fueron en SAC e IZT con 1,250 µg/m³ (1.4 ppm) y 1,132 µg/m³ (1.3 ppm), respectivamente; en el EDOMEX, las estaciones con los máximos en este indicador, fueron LPR con 1,214 µg/m³ (1.3 ppm) y NEZ con 1,078 µg/m³ (1.2 ppm).

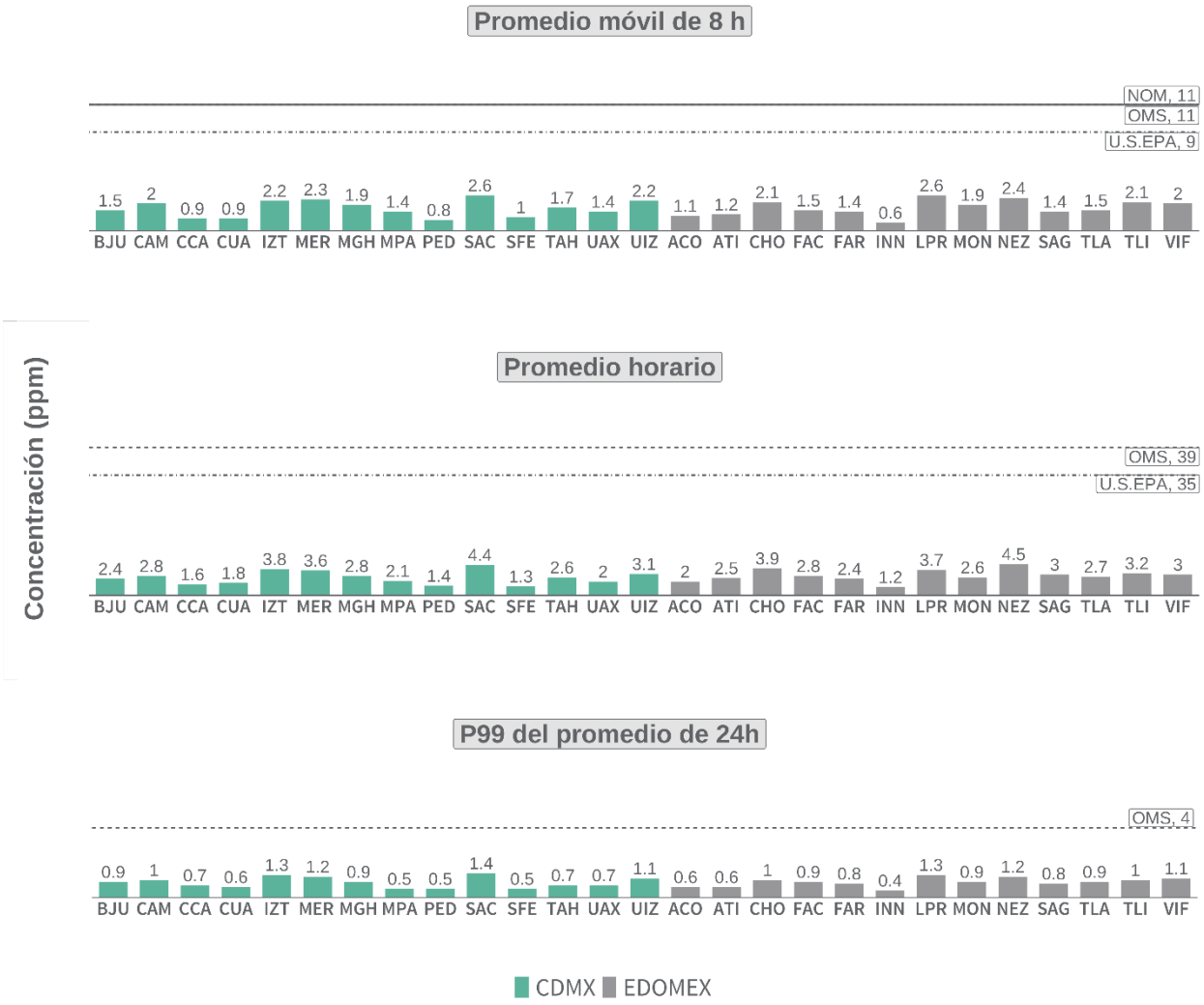


Figura 2.8. Concentración máxima de CO con respecto a los indicadores y límites de la NOM-021-SSA1-1993, OMS (convertido a ppm con 17°C, 585 mmHg) y las NAAQS de la U.S. EPA por estación de monitoreo.

OZONO (O_3)

El ozono troposférico se genera a partir de la combinación de óxidos de nitrógeno (NOx), Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) y radiación solar (Figura 2.9). El O_3 está relacionado con efectos adversos a la salud y en las grandes ciudades del mundo, como la ZMCM, constantemente se registran valores que superan los estándares establecidos a nivel mundial. Los principales síntomas de la exposición aguda o de corto plazo son: dolor de cabeza, irritación en ojos y garganta, dificultad respiratoria, tos, exacerbación del asma e incrementa visitas hospitalarias de personas con padecimientos respiratorios. Una exposición prolongada y constante, tiene consecuencias más graves en salud, que pueden aumentar el riesgo de muerte prematura por enfermedades respiratorias u ocasionar daños reproductivos y de desarrollo en recién nacidos (Rappazzo et al., 2021), también se incrementa el riesgo de ataques cardíacos, accidentes cerebrovasculares, así como de enfermedades e insuficiencia cardíaca (U.S. EPA, 2013). Los grupos de población más susceptibles son los adultos mayores, niños, embarazadas, asmáticos, personas que trabajan o se ejercitan en exteriores, así como las personas con enfermedades respiratorias preexistentes (U.S. EPA, 2022).

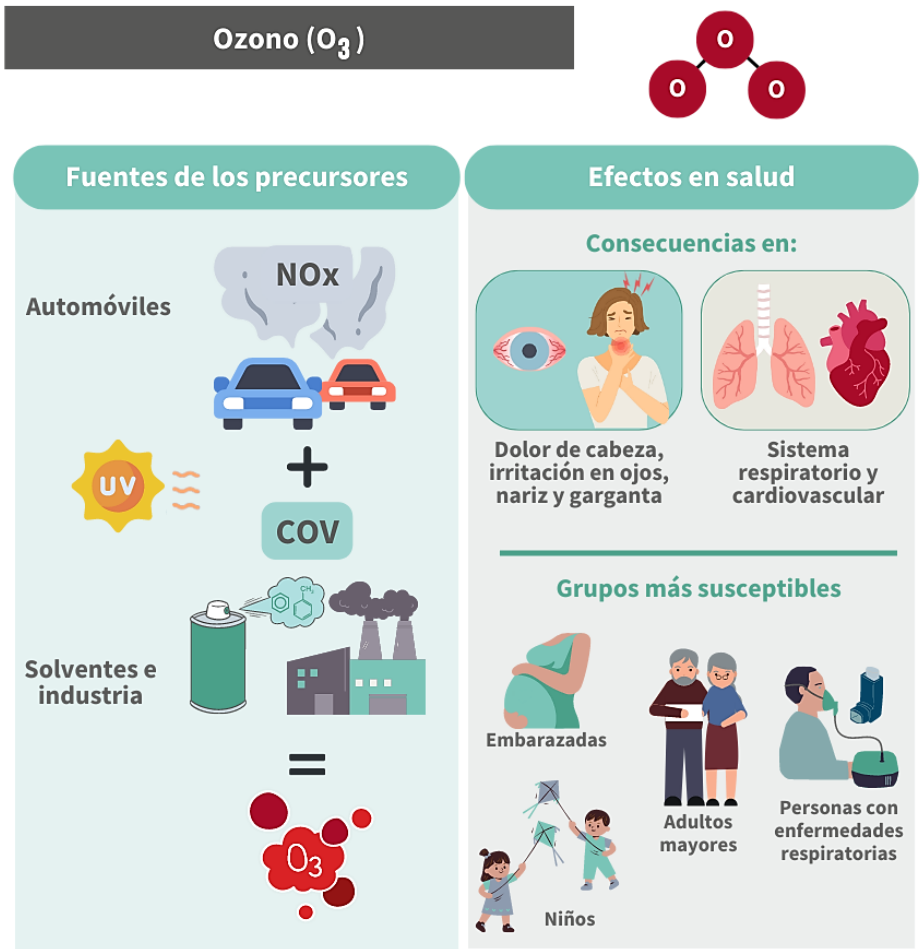


Figura 2.9. Formación de ozono y sus principales efectos en salud.

EVALUACIÓN DE LA NOM

La NOM-020-SSA1-2014 establece dos límites para ozono, un valor horario de 95 ppb y un promedio móvil de 8 horas de 70 ppb. En la ZMCM, la concentración de ozono ha sido una de las problemáticas más importantes que ha sido atendida por el gobierno de la ciudad desde la década de los 80's y con diversas políticas públicas, se ha logrado reducir los niveles extremos que se registraban diariamente durante los noventas; sin embargo, todavía no se cumplen los límites de la NOM vigente.

Durante 2021, el límite horario de 95 ppb se superó en 696 horas en total para la ZMCM y desagregado por entidad, la CDMX registró 637 horas, mientras que para el EDOMEX fueron 394 horas (**Tabla 2.6**). En el indicador del promedio móvil de 8 horas, el máximo de CDMX fue 126 ppb y en EDOMEX se alcanzaron 120 ppb. En los límites internacionales, el P99 del promedio de 8 h de la OMS establecido en 100 µg/m^3 se superó en ambas entidades, CDMX registró un máximo de 174 µg/m^3 (112 ppb) y para EDOMEX fue 161 µg/m^3 (104 ppb). El estándar de la U.S. EPA también se superó en toda la ZMCM, con 108 ppb en CDMX y 104 ppb en EDOMEX.

Tabla 2.6. Valores de concentración máxima de O_3 con respecto a los indicadores y límites de la NOM-020-SSA1-2014, las guías de la OMS y NAAQS de la U.S. EPA.

Entidad	NOM		OMS	U.S. EPA
	Número de horas	Promedio móvil 8 h	P99 del promedio móvil 8 h	Promedio trianual del 4to máx. del móvil 8h
	95 ppb	70 ppb	100 µg/m^3	70 ppb
ZMCM	696 horas	126 ppb	174 µg/m^3	108 ppb
CDMX	637 horas	126 ppb	174 µg/m^3	108 ppb
EDOMEX	394 horas	120 ppb	162 µg/m^3	104 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.

A nivel estación (**Figura 2.10**), los máximos del promedio móvil de 8 horas para CDMX se registraron en Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) con 126 ppb y Benito Juárez (BJU) con 123 ppb; mientras que, en EDOMEX fueron en los sitios Cuautitlán (CUT) con 120 ppb y Tultitlán (TLI) con 118 ppb. La estación con el máximo de número de horas que superó el límite horario de 95 ppb fue CCA con 371 horas para CDMX y para EDOMEX, fue en el sitio NEZ con 160 horas totales durante el 2021.

En el indicador de la OMS, la CDMX registró sus máximos en las estaciones Santa Fe (SFE) y BJU, con 174 µg/m^3 (112 ppb) y 171 µg/m^3 (110 ppb), respectivamente. En el EDOMEX, los valores más altos en el indicador de la OMS fueron en NEZ con 161 µg/m^3 (104 ppb) y CUT con 154 µg/m^3 (99 ppb). El estándar de la U.S. EPA registró un máximo de 108 ppb en las estaciones Gustavo A. Madero (GAM) y Pedregal (PED) de la CDMX; mientras que, en el EDOMEX, fue en los sitios FES Aragón (FAR) y NEZ, con 104 y 102 ppb, respectivamente.

En general, los valores más altos en la mayoría de los indicadores se presentaron en el centro y sur de la ZMCM, mientras que los mínimos, se registraron en estaciones del norte como Acolman (ACO), Montecillos (MON) y Los Laureles (LLA), así como sitios de la periferia como Ajusco (AJU) e Instituto de Investigaciones Nucleares (INN).

A través de los años se ha observado que la CDMX registra los valores más altos de ozono, así como mayor número de horas que rebasan la NOM, esto es debido a que los vientos dominantes son del norte hacia el sur y ocasionan el transporte de los precursores, por lo tanto, el ozono se forma en la trayectoria de los vientos y frecuentemente se acumula en la zona sur de la CDMX, que también está influenciada por la barrera natural de la región montañosa

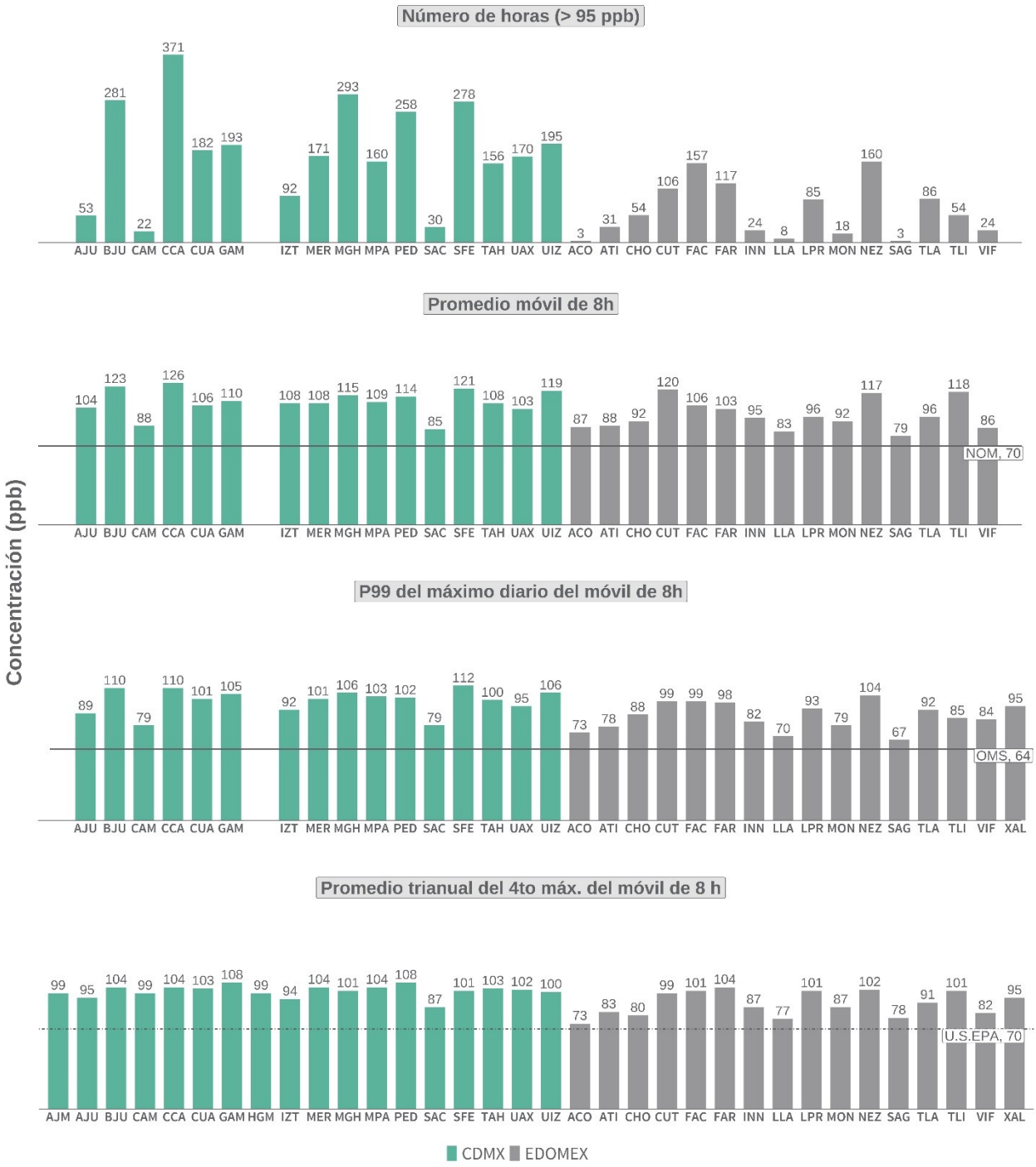


Figura 2.10. Concentración máxima de O_3 con respecto a los indicadores y límites de NOM-020-SSA1-2014, OMS (convertido a ppb con 17°C, 585 mmHg) y NAAQS de la U.S. EPA, por estación de monitoreo.

PARTÍCULAS

Las partículas suspendidas están constituidas por sólidos y gotas de líquidos; su origen es variable, pero en general, cualquier tipo de quema y las actividades que producen polvo son fuentes de partículas como son los incendios, emisiones de vehículos e industrias, quema de combustibles fósiles, leña y carbón, pirotecnia, tolvaneras y obras de construcción. Debido a la diversidad de fuentes de emisión, la composición química de las partículas es una mezcla compleja que varía por zona. A nivel internacional se regulan dos tamaños de partículas, las PM_{10} que tienen un diámetro menor a 10 micrómetros (µm) y las $PM_{2.5}$, llamadas partículas finas, con un diámetro menor a 2.5 µm. Las partículas causan diferentes efectos en la salud, que dependen de la composición y de su alcance en el sistema respiratorio, lo cual se relaciona con el tamaño de partícula (Figura 2.11). Las PM_{10}, con mayor diámetro, se sitúan en la superficie de las vías respiratorias y pulmones; mientras que las $PM_{2.5}$ llegan a los niveles más profundos e incluso al torrente sanguíneo, por lo que son el contaminante atmosférico con mayor impacto en la salud. La población más susceptible son niños, adultos mayores, embarazadas, personas con padecimientos cardiovasculares y respiratorios, con sobrepeso u obesidad y fumadores o exfumadores (U.S. EPA, 2019).

Figura 2.11. Principales fuentes de emisión y efectos en salud de las partículas.

Los efectos en salud de las $PM_{2.5}$ son más graves, ya que pueden ingresar y trasladarse a las partes más profundas del sistema respiratorio y al torrente sanguíneo, lo que afecta órganos y tejidos. Existen diversos estudios con evidencia concluyente sobre la exposición a $PM_{2.5}$ y la exacerbación de enfermedades cardiopulmonares preexistentes que conducen a una mayor morbilidad y mortalidad (Arias-Pérez et al., 2020).

De acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, por sus siglas en inglés), a nivel mundial, las $PM_{2.5}$ contribuyen con más de 4 millones de muertes por padecimientos como el EPOC, accidentes cerebrovasculares, enfermedades cardíacas, cáncer, infecciones respiratorias, diabetes, trastornos neonatales y otras enfermedades pulmonares crónicas (UNEP, 2021); por esta razón, las $PM_{2.5}$ son consideradas un peligro para la salud (**Figura 2.12**).

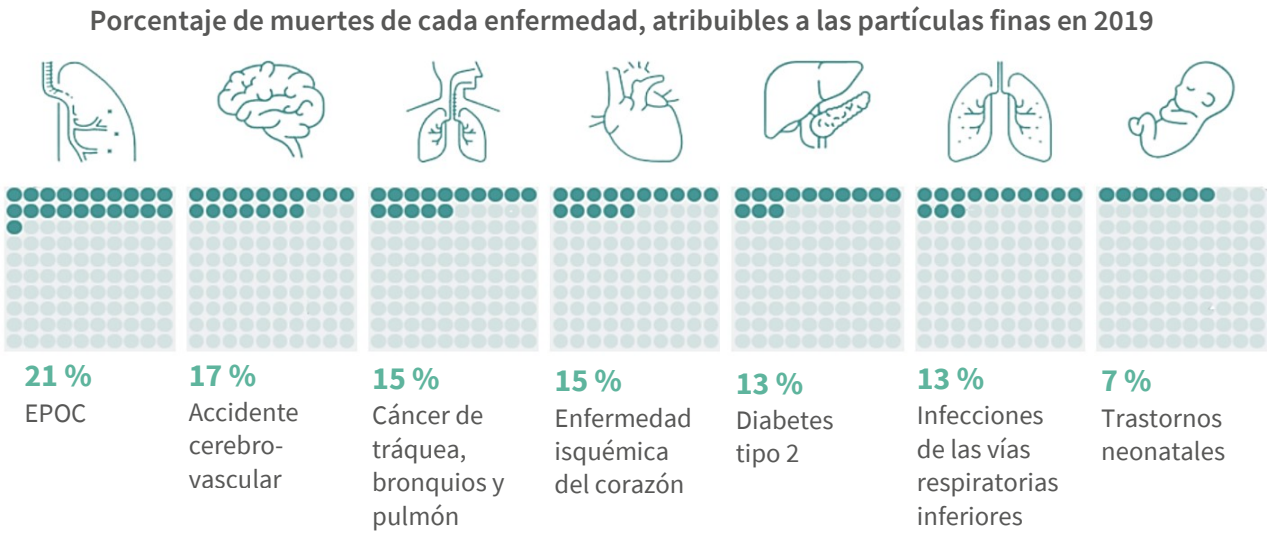


Figura 2.12. Porcentaje de muertes atribuibles por cada enfermedad. Adaptado al español de Pollution Action Note, UNEP, 2021

PM_{10}

La mayoría de las PM_{10} provienen de incendios, quemas y de resuspensión del suelo, como puede ser durante un evento de tolvanera. Debido a su tamaño, se depositan en la superficie de las vías respiratorias y pueden causar daño tisular e inflamación, así como empeoramiento de las enfermedades respiratorias, como el asma y el EPOC, ocasionan disminución de la función pulmonar, irritación de las vías respiratorias, tos y disnea. Estos síntomas de la exposición a PM_{10} se han relacionado con aumento de hospitalizaciones y visitas a emergencias. En la exposición a largo plazo, estas partículas se han asociado a un incremento del riesgo en mortalidad por causas respiratorias, cerebrovasculares y cardiovasculares (OMS, 2021).

EVALUACIÓN DE LA NOM

En México, la NOM-025-SSA1-2014 establece dos límites para las PM_{10}, un valor diario de 75 µg/m^3 y el límite anual es de 40 µg/m^3. En la ZMCM, este contaminante constantemente supera ambos límites con los valores más altos durante la temporada seca fría (noviembre a febrero) y frecuentemente, los máximos se presentan en el Estado de México debido a la cantidad de fuentes de emisión en la zona

Durante 2021 (Tabla 2.7), para los indicadores de 24 horas de la NOM y OMS, el máximo en CDMX fue 87 µg/m^3 mientras que para el EDOMEX fue 120 µg/m^3; en los valores anuales de la NOM y OMS, se registraron máximos de 49 y 55 µg/m^3 para CDMX y EDOMEX, respectivamente. Finalmente, en el indicador de la U.S.EPA, ambas entidades cumplieron con el límite, con 74 µg/m^3 (CDMX) y 104 µg/m^3 (EDOMEX).

Tabla 2.7. Valores de concentración máxima de PM_{10} con respecto a los indicadores y límites de la NOM-025-SSA1-2014, 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 2do máx. de 24h
	75 µg/m^3	40 µg/m^3	45 µg/m^3	15 µg/m^3	150 µg/m^3
ZMCM	120 µg/m^3	55 µg/m^3	120 µg/m^3	55 µg/m^3	104 µg/m^3
CDMX	87 µg/m^3	49 µg/m^3	87 µg/m^3	45 µg/m^3	74 µg/m^3
EDOMEX	120 µg/m^3	55 µg/m^3	120 µg/m^3	55 µg/m^3	104 µg/m^3

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.

En los datos por estación (Figura 2.13), el máximo del promedio de 24 horas de la NOM se registró en UIZ (87 µg/m³) y LPR (120 µg/m³) para CDMX y EDOMEX, respectivamente; mientras que los mínimos fueron en PED con 69 µg/m³ (CDMX) y NEZ con 79 µg/m³ (EDOMEX). En la métrica anual (NOM y OMS), el máximo de CDMX se registró en MER con 49 µg/m³ y en EDOMEX fue 55 µg/m³ en LPR; los mínimos fueron en PED con 31 µg/m³ y NEZ con 38 µg/m³, estos valores cumplieron con el límite anual de la NOM; sin embargo, la guía de la OMS fue rebasada en todas las estaciones. En el indicador P99 del promedio 24h (OMS), EDOMEX tuvo su máximo en LPR con 120 µg/m³, en CDMX el valor más alto fue en UIZ con 87 µg/m³. Para el estándar de la U.S. EPA, se observó el mismo comportamiento, el máximo de la ZMCM fue en LPR y el mínimo en PED con 104 y 58 µg/m³, respectivamente; por lo que todos los sitios registraron valores menores al límite en los estándares de la U.S. EPA.

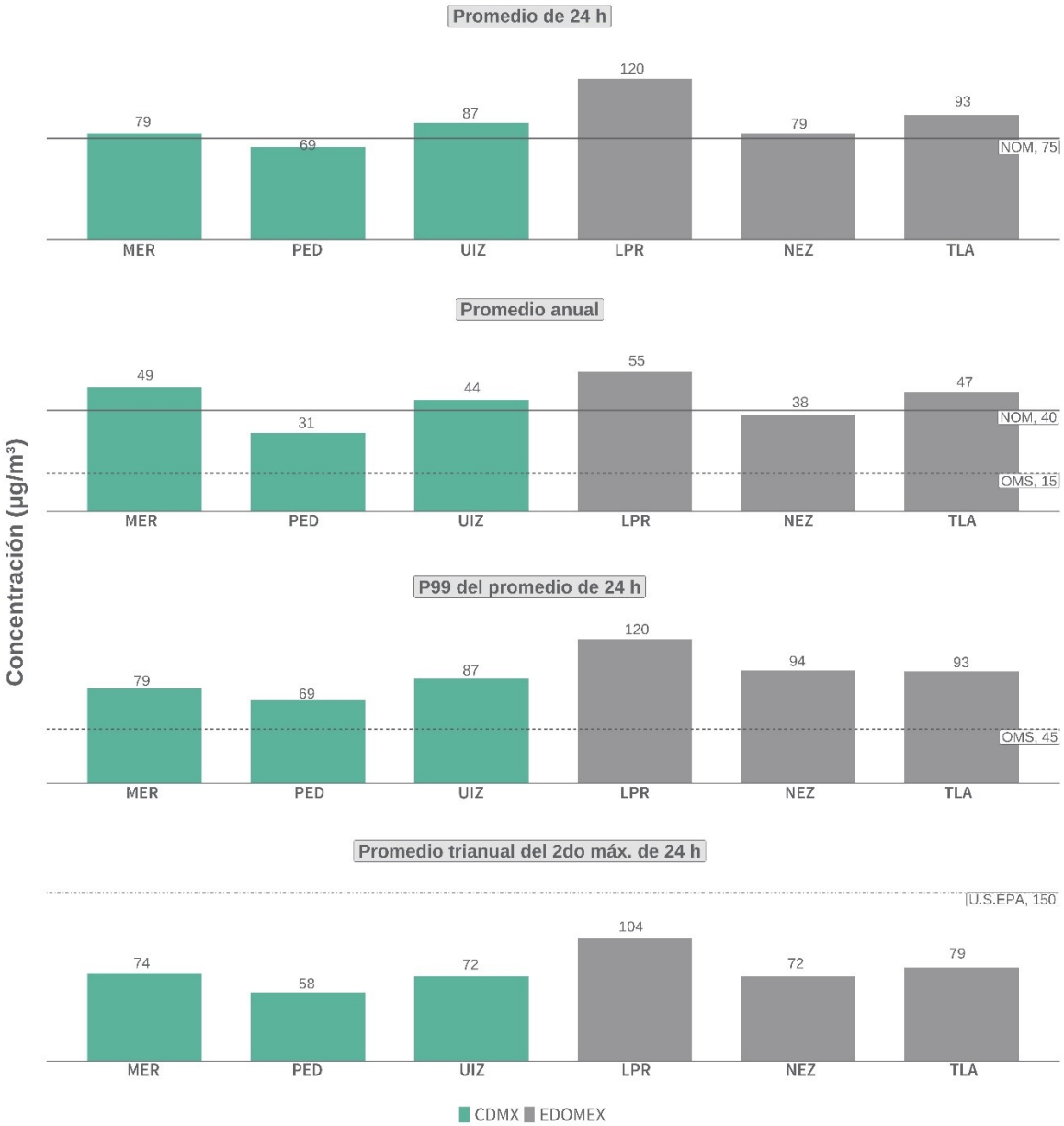


Figura 2.13. Concentración máxima de PM_{10} con respecto a los indicadores y límites de la NOM-025-SSA1-2014, OMS y NAAQS de la U.S. EPA, por estación de monitoreo.

$PM_{2.5}$

Las $PM_{2.5}$ están clasificadas como primarias y secundarias. Las **$PM_{2.5}$ primarias** se emiten directamente a la atmósfera, provienen de fuentes naturales (tormentas de polvo, incendios forestales) así como de fuentes antropogénicas, por ejemplo, la quema de combustibles fósiles y de biomasa, el humo de los cigarrillos y pirotecnia. En la ZMCM el mayor generador de $PM_{2.5}$ es el uso de pirotecnia durante las festividades de navidad y año nuevo. Las **$PM_{2.5}$ secundarias** se forman en la atmósfera como resultado de reacciones complejas con otros contaminantes, por ejemplo, con dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno, que son emitidos por centrales eléctricas, industrias, automóviles, entre otras fuentes (U.S. EPA, 2024). 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).

EVALUACIÓN DE LA NOM

La NOM-025-SSA1-2014 establece dos límites para las $PM_{2.5}$, el promedio de 24 horas de 45 $\mu g/m^3$, mientras que el promedio anual es de 12 $\mu g/m^3$. En la ZMCM, las $PM_{2.5}$ es uno de los contaminantes que no cumple con los valores normados, por lo que representa un problema importante de calidad del aire y de salud. Los valores más altos de $PM_{2.5}$ en la ZMCM ocurren durante la temporada seca fría (noviembre a febrero) e históricamente, los máximos se han presentado en el centro y norte de la ZMCM; sin embargo, algunos eventos de alta concentración de $PM_{2.5}$ han afectado la calidad del aire en toda la zona metropolitana, como sucedió en la contingencia de mayo del 2019, consecuencia de incendios masivos en el centro y sur del país.

En 2021, la ZMCM (**Tabla 2.8**), cumplió con el límite del promedio de 24 horas de la NOM de $PM_{2.5}$, con un máximo de 37 $\mu g/m^3$ para la CDMX y de 43 $\mu g/m^3$ para el EDOMEX. En el indicador anual de la NOM y OMS, se superaron ambos estándares, con máximos de 19 y 20 $\mu g/m^3$ para la CDMX y el EDOMEX, respectivamente. La métrica del P99 del promedio de 24 horas (OMS), ambas entidades superaron el nuevo valor guía de 15 $\mu g/m^3$, con el máximo en EDOMEX. Para los estándares de la U.S. EPA, el indicador de 24 horas se rebasó en la CDMX con 42 $\mu g/m^3$ y en el EDOMEX con 39 $\mu g/m^3$, mientras que la métrica trianual alcanzó el mismo valor máximo en ambas entidades (20 $\mu g/m^3$).

Tabla 2.8. Valores de concentración máxima de $PM_{2.5}$ con respecto a los indicadores y límites de la NOM-025-SSA1-2014, 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
	45 µg/m³	12 µg/m³	15 µg/m³	5 µg/m³	35 µg/m³	12 µg/m³
ZMCM	43 µg/m³	20 µg/m³	43 µg/m³	20 µg/m³	42 µg/m³	20 µg/m³
CDMX	37 µg/m³	19 µg/m³	37 µg/m³	19 µg/m³	42 µg/m³	20 µg/m³
EDOMEX	43 µg/m³	20 µg/m³	43 µg/m³	20 µg/m³	39 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.

A nivel estación (Figura 2.14), para el límite de 24 horas de la NOM, la CDMX presentó su máximo en los sitios MER y UIZ, ambos con 37 µg/m³, mientras que para el EDOMEX fue de 43 µg/m³ registrado en TLA. El mínimo del promedio de 24 horas para toda la ZMCM se presentó en San Agustín (SAG) con 33 µg/m³. En el promedio anual (NOM y OMS), los máximos también fueron en MER (19 µg/m³), UIZ (19 µg/m³) y TLA (20 µg/m³), mientras que los mínimos en PED y SAG con 14 y 16 µg/m³, respectivamente.

El indicador de 24 horas de la OMS se comportó de manera similar, con el máximo en MER y TLA, para la CDMX y el EDOMEX, respectivamente; mientras que el mínimo de la ZMCM fue en SAG. En los estándares de la U.S. EPA, para la métrica diaria, el máximo de la CDMX se registró en UIZ con 42 µg/m³ y en el EDOMEX fue de 39 µg/m³ en TLA, los mínimos de este indicador se presentaron en PED (30 µg/m³) y SAG (33 µg/m³), por lo que estos sitios cumplieron con el estándar de la U.S. EPA. En cuanto a la métrica trianual, los valores más altos se registraron en las estaciones MER y TLA, ambas con 20 µg/m³, los mínimos se registraron en PED con 15 µg/m³y en SAG con 17 µg/m³.

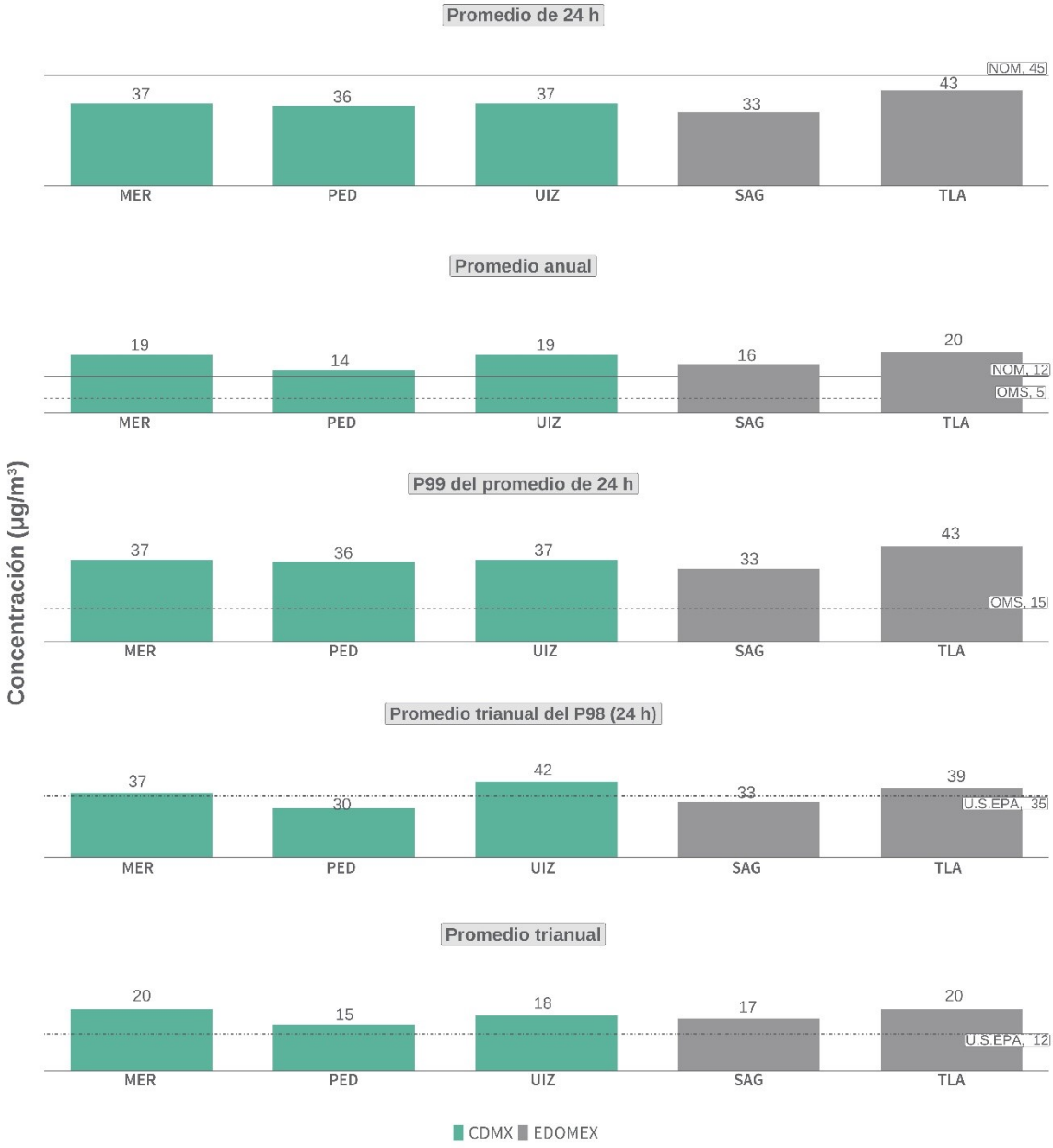


Figura 2.14. Concentración máxima de $PM_{2.5}$ con respecto a los indicadores y límites de la NOM-025-SSA1-2014, OMS y las NAAQS de la U.S. EPA, por estación de monitoreo.

CAPÍTULO 3

El tiempo

TEMPERATURA

La temperatura del aire es el resultado del balance energético entre la radiación solar incidente y la radiación emitida por la Tierra, en superficie o en otros niveles de altitud (AMS, 2020). La temperatura del aire depende de factores geográficos como la altitud, latitud y grado de incidencia de la radiación solar; así mismo de factores locales como la distancia al mar, el relieve, la hidrografía, la cobertura de vegetación, entre otros. Las unidades para medir temperatura son Kelvin (K) y los grados Celsius (°C) o Fahrenheit (°F); en México, se utiliza la escala en °C.

La temperatura promedio global, en la superficie terrestre y el océano, se ha incrementado en los últimos años y de acuerdo con la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), el 2021 fue el sexto año más cálido con respecto al periodo histórico 1880-2021 (**Tabla 3.1**). En 2021, la anomalía de temperatura en la superficie terrestre fue de +1.35 ± 0.14 °C (sexto más cálido) y en el océano fue de +0.65 ± 0.16 °C (séptimo más cálido). En el hemisferio norte se registraron anomalías importantes (**Figura 3.1**), con 1.54 °C y 0.81 °C, en la superficie terrestre y en el océano, respectivamente (NOAA, 2022). Los últimos siete años (2015 – 2021) han registrado las temperaturas más altas; el 2021 fue menos cálido que años pasados debido a la influencia de **La Niña** a principios y finales de año (WMO, 2022).

Tabla 3.1. Anomalías de temperatura del año 2021 y los registros más altos, a nivel global y en el hemisferio norte. **Fuente**: Monthly Global Climate Report for Annual 2021. NOAA (2022)

Nivel	Tipo	Anomalía del 2021 (°C)	Ranking del 2021	Registros más altos	
				Año	Anomalía (°C)
Global	Tierra	+1.35 ± 0.14	6to más cálido	2020	+1.58
	Océano	+0.65 ± 0.16	7mo más cálido	2016	+0.80
	Tierra y océano	+0.84 ± 0.15	6to más cálido	2016	+0.99
Hemisferio norte	Tierra	+1.54 ± 0.16	3ro más cálido	2020	+1.74
	Océano	+0.81 ± 0.16	7mo más cálido	2020	+0.99
	Tierra y océano	+1.09 ± 0.15	6to más cálido	2020	+1.27

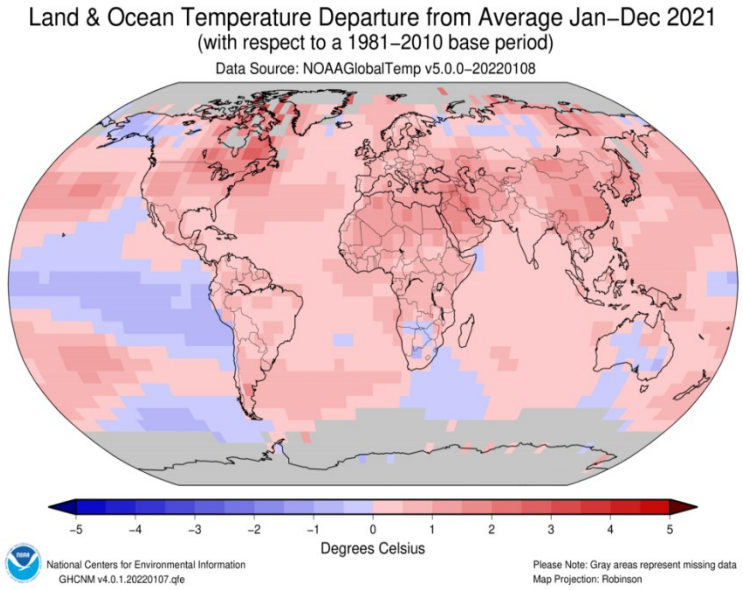


Figura 3.1. Anomalía de la temperatura global durante 2021. El mapa presenta la desviación promedio de la temperatura en la superficie terrestre y el océano durante 2021, con respecto al periodo 1981-2010. **Fuente**: NOAA (https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/ghcn-gridded-products/maps/202113, **consultado**: 10/oct/2023).

El Niño-Oscilación Sur (ENOS) crea fluctuaciones en el sistema climático global, aunque no es un evento cíclico, en las últimas investigaciones se ha encontrado que estas variaciones pueden tener una ocurrencia cada dos a siete años y provocar alteraciones importantes en los patrones climáticos existentes en diferentes partes del mundo (Hanley et al., 2003). El ENOS, es un fenómeno de interacción océano-atmósfera, caracterizado por tres fases, una cálida (El Niño), una fría (La Niña) y una fase Neutra. Los patrones climáticos El Niño y La Niña (fase cálida y fría del ENOS, respectivamente), están asociados a condiciones anómalas en la temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés), de hasta 0.5 °C por arriba o debajo del promedio del periodo 1981 – 2010, que son medidas en la región oriental del océano Pacífico ecuatorial. El Niño incrementa la temperatura a escala global, mientras que La Niña tiende a reducir ligeramente la temperatura (SMN, CONAGUA. 2022). La tercera fase del ENOS, la Neutra, se presenta cuando los valores de la SST y del viento en el Pacífico ecuatorial son cercanos a los normales (Bravo-Cabrera, 2017).

Desde enero hasta marzo de 2021, prevalecieron condiciones de La Niña, las cuales iniciaron desde agosto de 2020. Sin embargo, a mediados de marzo se presentó una fase Neutra, debido a una disminución del enfriamiento en la región oriental del Pacífico ecuatorial. La fase Neutra permaneció hasta septiembre y en el último trimestre del año, se regresó a condiciones de La Niña. Incluso con los efectos de La Niña, el 2021 se clasificó como uno de los 10 años más cálidos a nivel mundial (SMN, CONAGUA. 2022).

A nivel nacional, la temperatura promedio en el 2021 fue de 22.2 °C, esto corresponde a 1.2 °C arriba del promedio climatológico 1981 – 2010. El Reporte Anual 2021 del Clima en México de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), ubicó al 2021 como el cuarto año más cálido desde 1953, esto mantiene la tendencia de las temperaturas anuales, las cuales han sido superiores al promedio histórico desde 2004. En el análisis mensual, enero presentó la temperatura mínima (16.4 °C) y no superó su valor histórico; sin embargo, en el resto de los meses, de febrero a diciembre se registraron temperaturas superiores a sus promedios climatológicos y junio fue el mes más cálido del año, con un promedio nacional de 26 °C. En diciembre de 2021 se presentó una temperatura mayor a su valor climatológico y se convirtió en el diciembre más cálido de todo el registro histórico. Los meses junio a septiembre corresponden a la temporada de verano y durante el 2021, la temperatura promedio en este periodo fue de 25.8 °C, por lo que fue el décimo verano más cálido (SMN, CONAGUA. 2022).

De acuerdo con la información histórica disponible del SMN, la Ciudad de México registró su tercer año más cálido desde 1953 (SMN, CONAGUA, 2022). La temperatura promedio anual en la ZMCM, estimada a partir de los datos de la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET), fue de 16.6 °C (**Figura 3.2a**), este valor fue 0.4°C menor que el reportado en 2020 con 17 °C. En la serie de tiempo también se observa que la época de primavera, de marzo a mediados de junio, fue más cálida (promedio = 18.3 °C) que la temporada de verano, la cual se extiende desde finales de junio a septiembre (promedio = 17.5 °C).

El mes más cálido fue abril con un promedio de 18.6 °C y el más frío fue noviembre con 14.3 °C (**Figura 3.2b**). De acuerdo con el perfil horario del 2021, las temperaturas más bajas se presentaron entre las 01:00 h y las 08:00 h, mientras que las más altas se registraron entre las 13:00 y 16:00 h (**Figura 3.2c**), lo cual está relacionado con la cantidad de radiación solar recibida durante el día. La estación con la temperatura anual promedio más alta fue Gustavo A. Madero (GAM) con 18.3 °C, mientras que los sitios Investigaciones Nucleares (INN) y Ajusco (AJU) registraron los mínimos, ambas con 11.1 °C (**Figura 3.2d**).

Esta distribución espacial de la temperatura ha sido constante a través de los años, donde las estaciones del centro y norte presentan los valores más altos, mientras que los sitios de la periferia tienen temperaturas menores. Esto se debe al entorno de las estaciones y al efecto de isla de calor urbana, el cual ocasiona que la zona más urbanizada, registre mayores temperaturas ocasionadas por los materiales de construcción de calles y edificios.

La temperatura mínima horaria fue -3.9 °C durante el 2 de enero en la estación Ajusco (AJU) a las 07:00 h. Este valor estuvo asociado al paso del frente frío 24 de la temporada 2020-2021, que afectó la mayor parte del territorio nacional y quedó estacionario sobre el Golfo de México del 1 al 5 de enero. Este frente provocó temperaturas frías en el noroeste del país y la formación de dos tormentas invernales, por lo que el 2 de enero también se presentó el mínimo anual a nivel nacional con -18.3 °C en Cumbres de Majalca, Chihuahua (SMN, 2021).

La temperatura máxima horaria en la ZMCM fue 33.2 °C, registrada en la estación Montecillo (MON) a las 15:00 h del 28 de marzo. Este máximo estuvo relacionado con los valores extremos de temperatura registrados en el centro del país, asociados a la influencia de un sistema anticiclónico en niveles bajos y medios de la tropósfera, que favoreció condiciones de fuerte estabilidad atmosférica, provocando la disminución de la nubosidad y una mayor intensidad de la radiación solar (SMN, 2022).

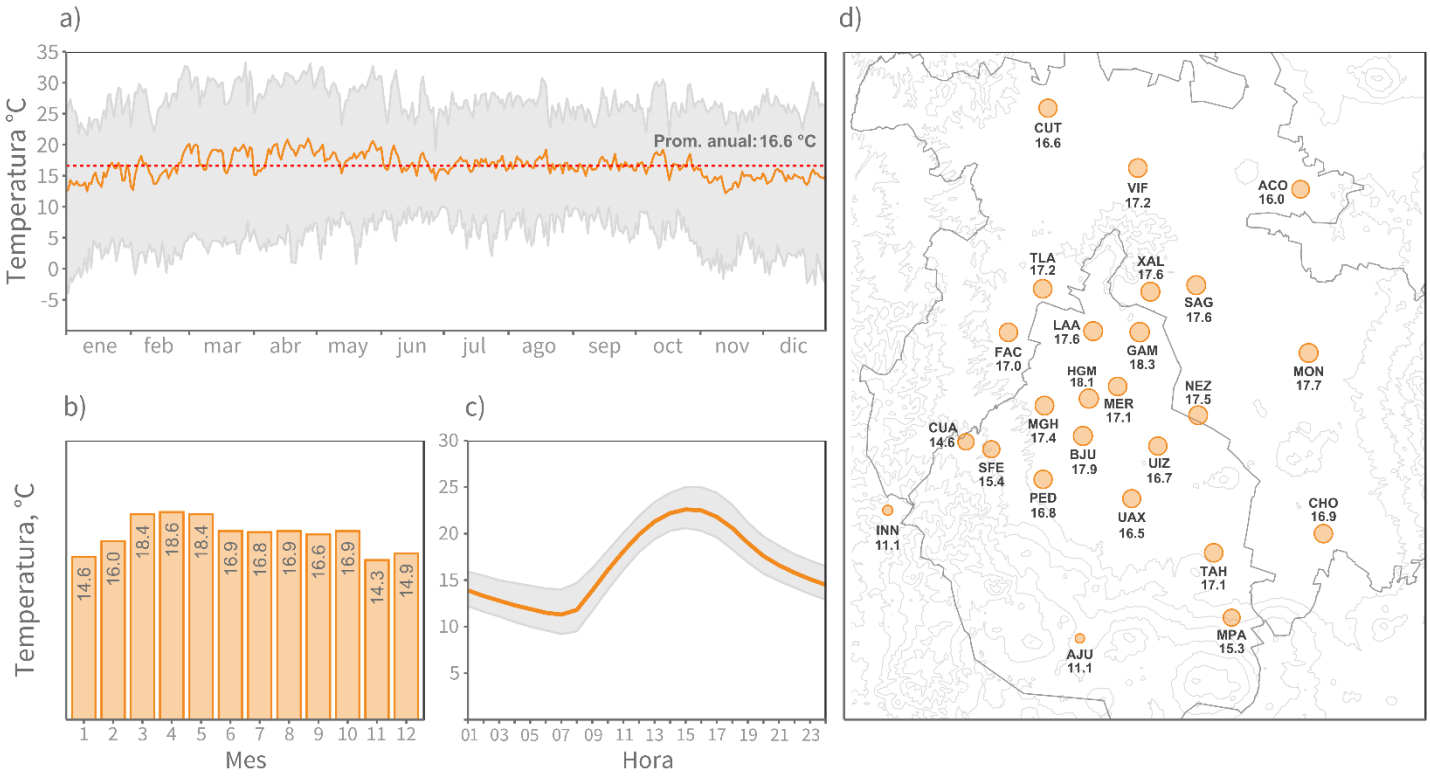


Figura 3.2. Comportamiento de la temperatura ambiente durante 2021. **a)** Serie de tiempo con el promedio diario (línea naranja continua), máximo y mínimo (sombreado gris) y el promedio anual (línea roja punteada). **b)** Promedio mensual. **c)** Perfil horario, la línea naranja es el promedio en cada hora y el sombreado gris es el percentil 25 y 75, respectivamente. **d)** Promedio anual (°C) por estación.

Cálculo de anomalías

El análisis de anomalías de temperatura (**Figura 3.3**) se calculó con las guías de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) en la publicación "Directrices de la OMM sobre el cálculo de normales climáticas" (OMM, 2017), además, se consideraron las características de nuestra red de estaciones meteorológicas para ajustar el cálculo de promedios de los períodos según la suficiencia de datos disponibles.

En el caso de la REDMET, se seleccionó el período de 12 años entre 2008 y 2019 debido a la consistencia en los datos, posteriormente se aplicaron filtros diarios por estación, después mensuales y finalmente, para el período, como se establece en la guía de la OMM.

Para el **filtro diario** se aplicó una suficiencia del 75 % de las horas válidas, lo cual es la sugerencia de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. EPA, 2008) para las estaciones con fines de medición operativa de la calidad del aire; además, se excluye del análisis aquellos días en los que hay ausencia de datos en más de 6 horas.

En el **filtro mensual**, la guía OMM sugiere que se descarten los meses en los que faltan observaciones de 11 o más días **aleatorios** dentro del mes, o bien, si faltan observaciones de 5 o más días **consecutivos** dentro del mes. Sin embargo, para REDMET el criterio usado fue del 70 % de datos diarios válidos, condición que es más flexible para nuestra red, ya que en ocasiones el mantenimiento de los equipos se prolonga por más de 5 días consecutivos, lo que compensa los posibles errores al reducir el número de días aleatorios que se admiten como ausentes.

Para el **filtro del período** de los 12 años considerados, se aplicó una suficiencia del 75 %, por lo tanto, se deberá cumplir con promedios mensuales de temperatura válidos en, al menos, 9 de los 12 años. Este método se utilizó para las variables meteorológicas de temperatura, humedad relativa, velocidad de viento y presión atmosférica.

Después de aplicar los filtros mencionados, solamente 7 estaciones (TLA, FAC, VIF, MER, PED, TAH y, XAL) cumplieron con los criterios considerados para el cálculo de las anomalías de temperatura; sin embargo, como lo refiere la OMM, lo importante es calcular las anomalías para observar tendencias en el comportamiento de las variables. En la ZMCM, el año 2021 presentó valores por encima del promedio (2008-2019) en los meses de enero a abril, así como en octubre y diciembre, con la anomalía positiva máxima durante enero (valores por encima de lo normal). Se registraron anomalías negativas (valores debajo del promedio histórico) de mayo a septiembre y noviembre, la anomalía negativa más notable fue en junio (**Figura 3.4**).

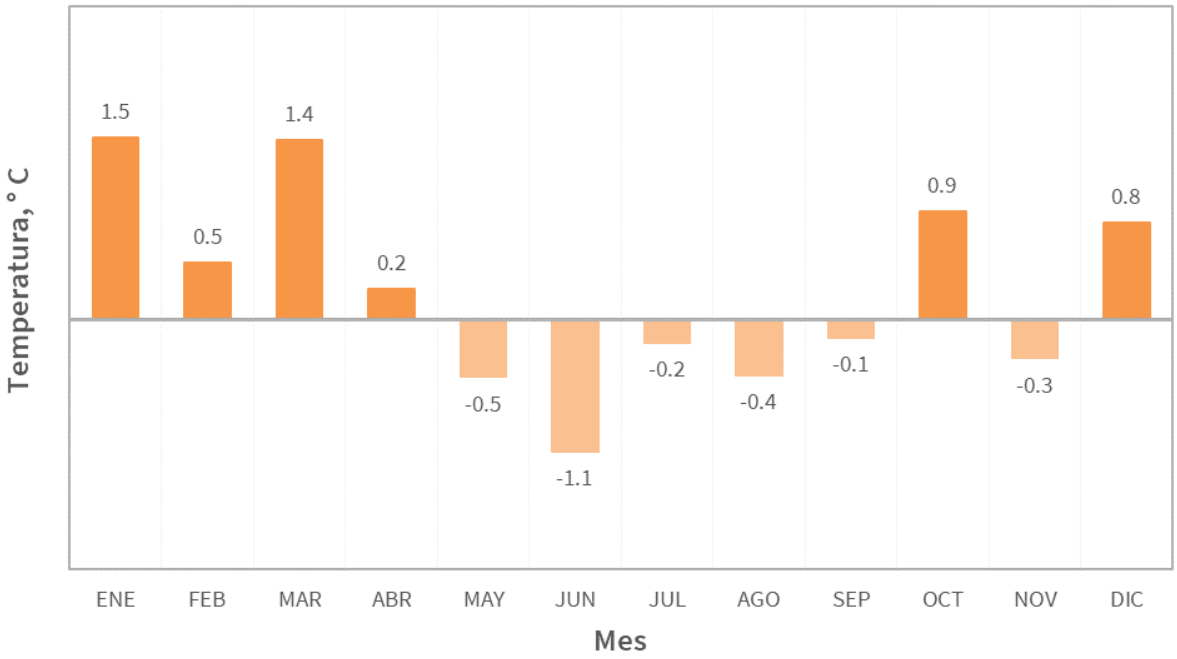


Figura 3.4. Anomalía mensual de la temperatura en 2021, calculada con respecto a la media mensual del período 2008-2019 en las estaciones TLA, FAC, VIF, MER, PED, TAH, XAL.

HUMEDAD RELATIVA (HR)

La humedad se define como la cantidad de vapor de agua contenida en un volumen determinado de aire. La humedad relativa (HR) se expresa en porcentaje e indica la razón entre la presión de vapor y la presión de vapor de saturación con respecto al agua (AMS, 2020). La humedad disminuye con la altitud y también influye la latitud, ya que la HR se reduce del ecuador hacia los polos y por esta razón, es 10 veces mayor cerca del ecuador, debido a que hay más evaporación, ocasionada por la incidencia de mayor radiación solar (Hartmann, 2015).

En términos de calidad del aire, se ha documentado que la HR tiene influencia en la composición química y tamaño del material particulado (Han et al., 2019). De acuerdo con un estudio realizado en China, la HR tiene una fuerte correlación negativa con PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2, CO y NO_2 (Liu et al., 2020). La HR es un factor importante en la formación y dispersión de los contaminantes del aire, en la visibilidad, las características termodinámicas de la atmósfera y las interacciones gas-partícula (SEDEMA, 2017).

En México, el comportamiento de la humedad y de la precipitación es similar, con dos periodos climatológicos definidos, la temporada seca de noviembre a abril y la húmeda de mayo a octubre (Jáuregui, 1971). Dicha estacionalidad se debe a factores sinópticos y de circulación atmosférica a gran escala, como son las ondas y ciclones tropicales, cambios en la posición de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), o por influencia del Monzón de Norteamérica, entre otros (SMN, 2022). En nuestro país, el inicio del 2021 tuvo humedad escasa que conllevó a un escenario anormalmente seco. Esta condición se mantuvo hasta la primera quincena de mayo; mientras que, durante la segunda quincena el aporte de humedad fue mayor y mitigó los daños ocasionados por la sequía en los meses anteriores (SMN, 2022).

El promedio de HRP para 2021 en la ZMCM fue de 53.5 %, lo cual fue 1.1 % mayor que en el 2020. En la serie de tiempo de 2021, se observó que en el periodo de mayo a octubre se presentó mayor humedad, comparado con el promedio anual (**Figura 3.4a**). En abril, se registraron lluvias durante 15 días, principalmente en la zona sur, así como en el centro y norte (SACMEX, 2021); sin embargo, no fueron tan abundantes como de mayo a octubre, por lo que en abril no se ve reflejado un incremento notable en la HR (**Figura 3.4a**). El promedio mensual más alto se registró en septiembre con 70 %, mientras que el mínimo fue durante febrero con 34 % (**Figura 3.4b**).

El perfil horario muestra que las mañanas, hasta las 09:00 h, son más húmedas que el resto del día (**Figura 3.3c**), este patrón es congruente con la relación de la HR con la temperatura, ya que son inversamente proporcionales; es decir, cuando la temperatura comienza a incrementar, la HR disminuye.

El promedio anual de humedad relativa por estación fue mayor al 60 % en los sitios ubicados al sur de la CDMX, así como en la periferia noroeste de la zona metropolitana. En las estaciones del centro, la humedad se ubicó entre el 46 y 57 % (**Figura 3.4d**), estos valores mínimos están relacionados con el efecto de isla de calor urbana, el cual aumenta la temperatura.

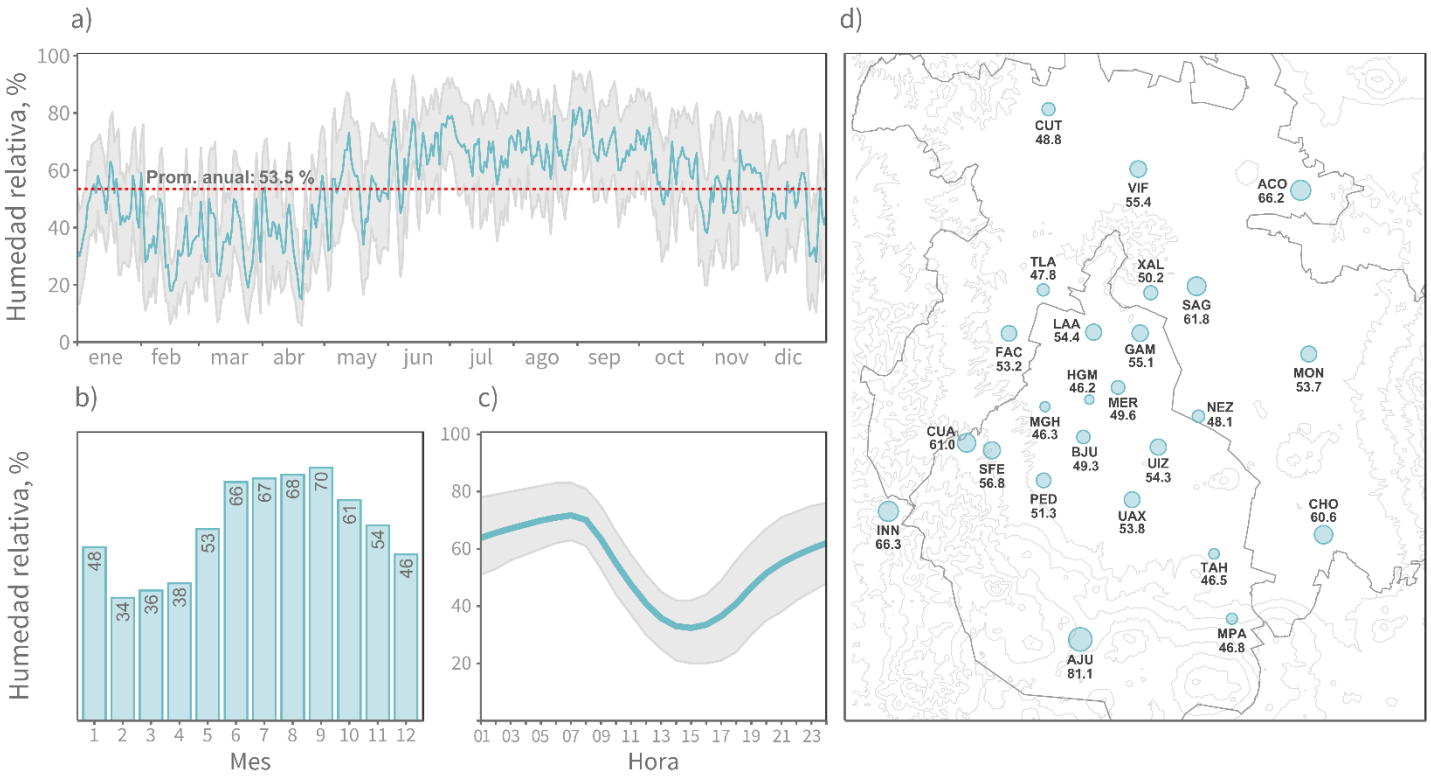


Figura 3.4. Comportamiento de la humedad relativa en 2021. **a)** Serie de tiempo con el promedio diario (línea azul continua), máximo y mínimo (sombreado gris) y el promedio anual (línea roja punteada). **b)** Promedio mensual. **c)** Perfil horario, la línea azul es el promedio en cada hora y el sombreado gris es el percentil 25 y 75, respectivamente. **d)** Promedio anual (% HR) por estación.

El cálculo de anomalías de HR para la ZMCM (**Figura 3.5**) se aplicaron los mismos criterios que se explicaron en la sección de temperatura de este capítulo y se utilizaron los datos de las estaciones TLA, FAC, VIF, MER, PED y XAL. En las anomalías de HR, se observó que febrero presentó la anomalía negativa más alta, lo que es congruente con lo reportado por el SMN, ya que en el periodo de febrero a abril se registraron aportes mínimos de humedad en el país y el mes de febrero se clasificó como el séptimo más seco desde 1941 (SMN, 2021). Durante mayo y junio, las anomalías positivas coinciden con la llegada de la temporada de lluvias y sistemas tropicales, que disminuyeron las condiciones de sequía a nivel nacional; en este periodo, mayo fue el decimonoveno y junio el sexto mes más lluvioso con respecto al promedio histórico en todo el país (SMN, 2021).

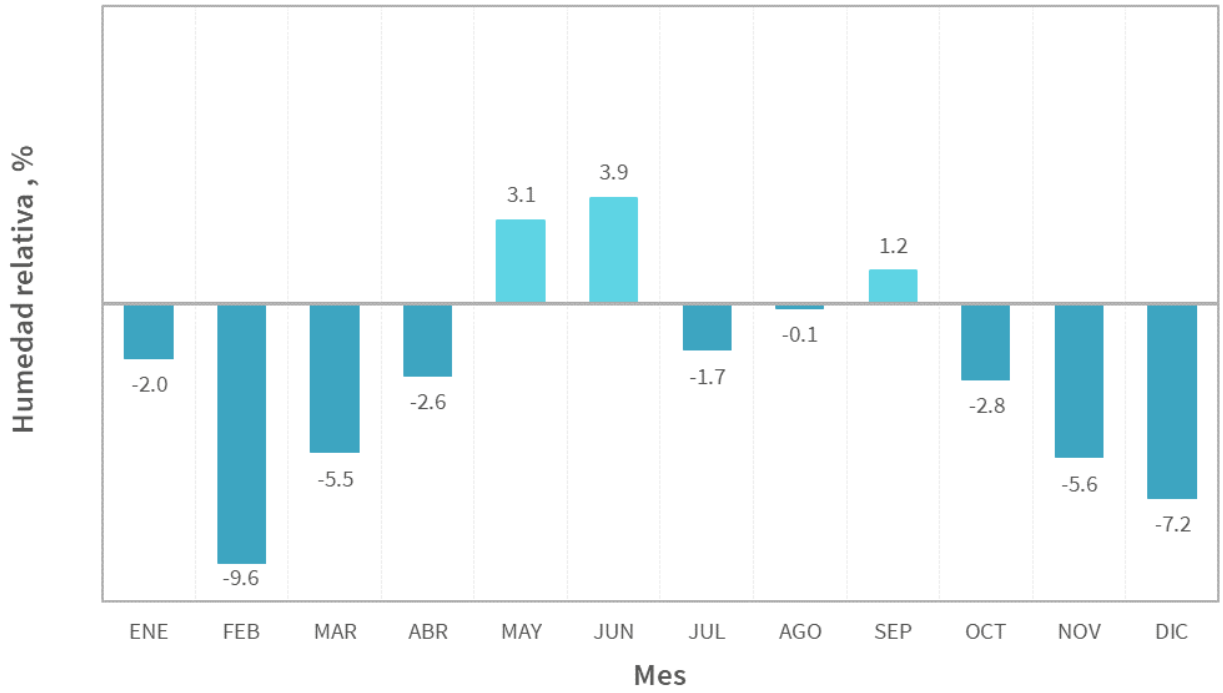


Figura 3.5. Anomalía mensual de la humedad relativa en 2021, calculada con respecto a la media mensual del período 2008-2019 en las estaciones TLA, FAC, VIF, MER, PED, XAL.

PRECIPITACIÓN PLUVIAL

La precipitación es un proceso que tiene lugar en la atmósfera, donde el agua, en estado sólido, líquido o combinación de ambos, cae hacia la superficie por la acción de la gravedad (AMS, 2020). La precipitación en estado líquido se conoce como lluvia (diámetro de gota > 0.5 mm) y llovizna (diámetro de gota < 0.5 mm); ambos tipos tienen diferentes impactos en la visibilidad, lo cual depende de su duración e intensidad (AMS, 2020). A nivel global, el 2021 tuvo una precipitación promedio de 2.66 mm/día, lo cual estuvo por debajo de la media climatológica de los últimos 40 años (2.69 mm/día). Este comportamiento estuvo asociado a la influencia del fenómeno ENSO en su fase negativa “La Niña” (NOAA, 2022).

En México, la precipitación acumulada durante 2021 fue 769.5 mm, lo cual estuvo 3.7 % por encima del periodo climatológico 1981-2010 (742.2 mm). Sin embargo, en comparación con la precipitación anual registrada desde 1941, el 2021 tuvo condiciones consideradas normales, ya que no se clasificó entre los años más secos o lluviosos (SMN, 2022). Los máximos de precipitación se registraron de mayo a octubre, mientras que los mínimos fueron entre noviembre y abril. El mes más lluvioso fue agosto y el más seco fue en febrero, con precipitación acumulada promedio de 157.0 mm y 7.9 mm, respectivamente.

En el 2021, la temporada de lluvias en el centro de México comenzó en abril, unos días antes de lo esperado, esto debido al transporte de humedad del Golfo de México y a la presencia de los frentes fríos 51, 52 y 54. El periodo de lluvias en el centro del país también tuvo mayor duración, a diferencia de lo que ocurrió en las regiones norte y sur del país, donde el periodo fue más corto. En la Ciudad de México, el frente frío 54 provocó eventos de granizo severo durante abril, el más destacado fue el del día 28 (**Figura 3.6**), que afectó principalmente a la alcaldía Cuauhtémoc (SMN, CONAGUA. 2022).

Figura 3.6. El Zócalo de la Ciudad de México cubierto por granizo durante el 28 de abril 2021 (ADN40, 2021).

De acuerdo con los datos de lluvias medidos por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), el promedio máximo de precipitación acumulada diaria se presentó el 13 de junio con 32 mm y el mínimo fue 0.1 mm, el cual se registró en varios días de enero, noviembre y diciembre (**Figura 3.7**). Aproximadamente, el 97 % del volumen total de precipitación fue durante la temporada de lluvia (mayo - octubre); el mes más lluvioso fue junio con un promedio de precipitación acumulada de 169 mm, mientras que el más seco fue diciembre con 0.09 mm.

El promedio de la precipitación acumulada en todas las alcaldías de la CDMX fue de 764 mm, con un máximo de 1,069 mm en Magdalena Contreras, mientras que el mínimo se presentó en Benito Juárez con 301 mm (Figura 3.8).

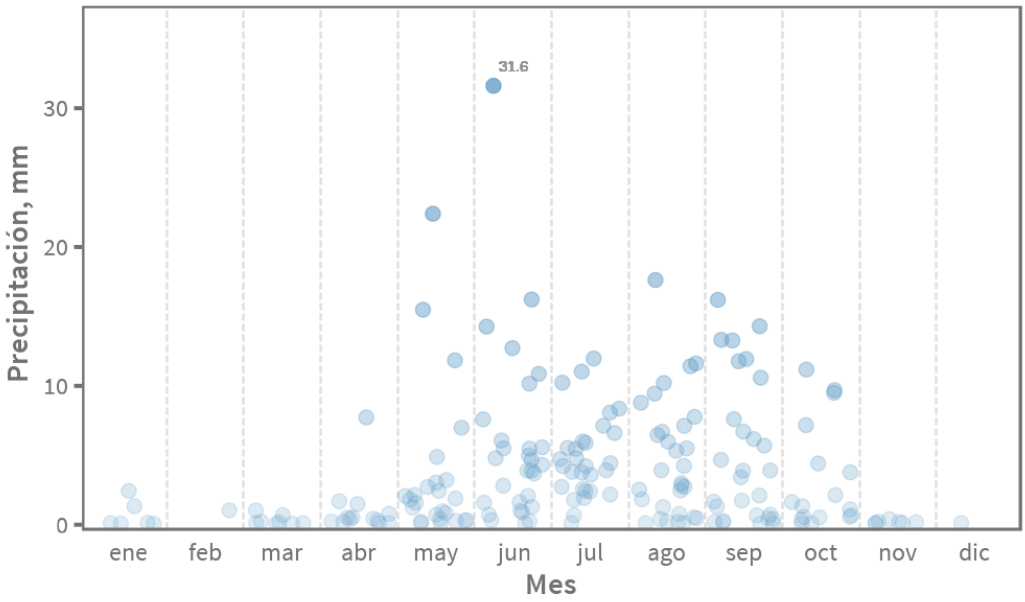


Figura 3.7. Distribución mensual del promedio de la precipitación acumulada diaria calculada con los datos de las estaciones del SACMEX.

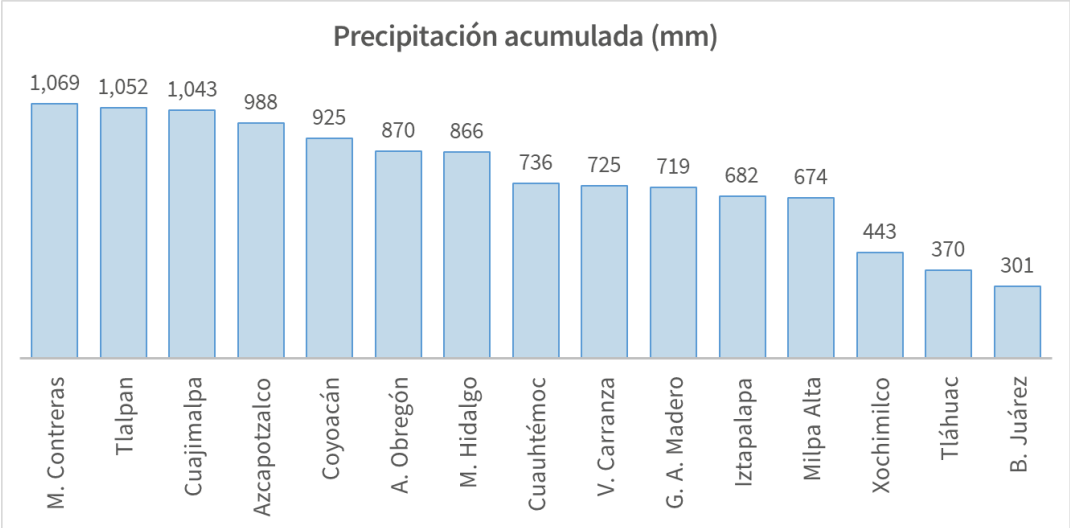


Figura 3.8. Precipitación acumulada por alcaldía de la CDMX durante 2021 (SACMEX, 2021).

VIENTO

El viento es el movimiento del aire con respecto a la superficie terrestre y se estudia mediante dos variables: velocidad (o intensidad) y la dirección desde donde proviene. El comportamiento del viento responde a factores como la densidad de una columna de aire, el gradiente de temperatura, cambios en la presión atmosférica y la fricción con la superficie (Hartmann, 2015). En términos de calidad del aire, la velocidad del viento es una variable que influye en la acumulación de contaminantes, ya que determina la dispersión, turbulencia y la dirección de desplazamiento del aire (García et al., 2014).

Los efectos del viento en la calidad del aire ya se han estudiado en la ZMCM; en el análisis por De Foy (2005) se describieron los patrones de viento en abril del 2003, en un estudio sobre la química atmosférica. Los resultados asociaron los máximos de O_3 con comportamientos sinópticos y se identificaron 3 tipos de episodios (**Tabla 3.2**).

Tabla 3.2. Clasificación de condiciones sinópticas en los episodios durante la campaña MCMA 2005 (de Foy et al., 2005).

CATEGORÍA	EPISODIOS SINÓPTICOS	CONCENTRACIÓN DE OZONO
O_3-Sur	Flujo sinóptico medio dominado por circulación anticiclónica de bajo nivel sobre el centro-sur de México, con vientos del oeste a norte y vientos débiles en la superficie. Ocurren cuando un sistema de alta presión está sobre el Pacífico oriental.	Los días con este episodio (7 días en total), registraron O_3 > 150 ppb y un día con O_3 > 200 ppb. Los máximos fueron en el sur.
Oleada de Frío o el Norte (*Cold surge*)	Influencia del fenómeno “el Norte”, con temperaturas bajas y lluvias. Es una corriente que transporta aire frío y húmedo del noreste hacia el golfo de México, la Sierra Madre Oriental y Meseta Central (SEDEMA, 2016). Esta corriente provoca estabilidad en la mañana y máximos de O_3 en el centro de la ZMCM (SEDEMA, 2016).	Los días clasificados en estas condiciones (10 en total) tuvieron una amplia distribución de concentración, de 140 a 175 ppb.
O_3-Norte	Presencia de sistemas de baja presión sobre E.U.A, con poca actividad en el sur. Vientos del oeste y condiciones anticiclónicas muy débiles en el sur, así como una corriente subtropical de chorro en el norte de la ZMCM. Los máximos de O_3 ocurrieron en el norte de la CDMX.	Los episodios en esta categoría (17 días) tienen una distribución más estrecha, con $O_3 \geq 170$ ppb y tres días con O_3 > 200 ppb.

De acuerdo con los datos de la REDMET durante 2021, el campo de viento diurno (**Figura 3.9**) para enero y febrero, presentó una dirección predominante del este-sureste hacia el oeste-noroeste de la ZMCM. De marzo a diciembre se observaron vientos dominantes del norte-noreste hacia el sur-suroeste; en algunos meses se registraron confluencias de viento en el centro, ocasionadas por corrientes provenientes del norte, este y sureste. En diciembre, se observó una disminución en la intensidad del viento; sin embargo, se mantuvo la dirección dominante del norte-noreste hacia el sur-suroeste. Este patrón de dirección de viento es congruente con años pasados y es una de las razones del transporte de contaminantes hacia el sur de la ZMCM, como es el caso de O_3 y SO_2.

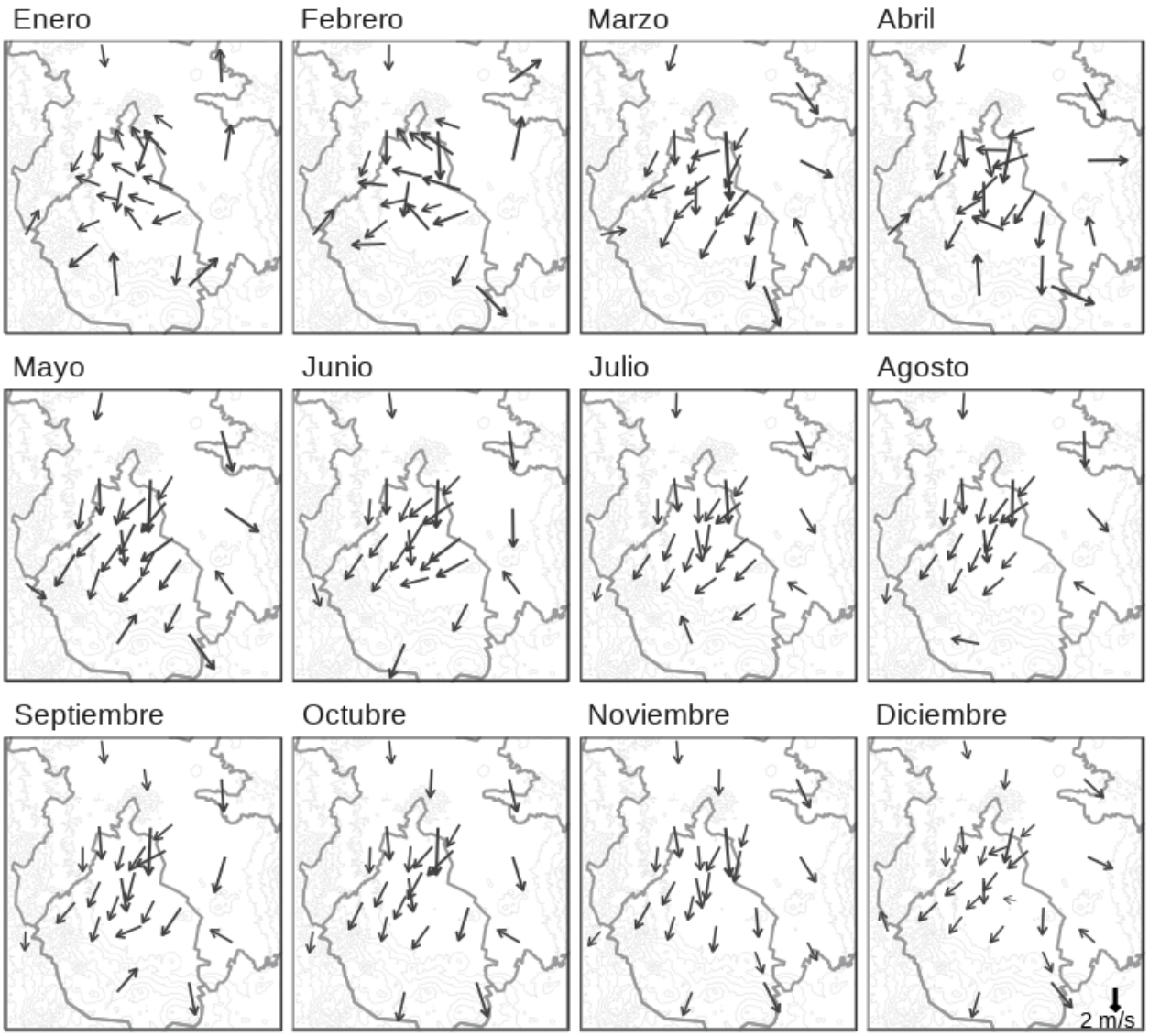


Figura 3.9. Campo de viento diurno en superficie. Las flechas de los vectores representan la dirección del viento predominante por mes entre las 08:00 y las 20:00 h; el tamaño del vector es proporcional a la intensidad del viento.

El promedio de velocidad de viento en 2021 fue de 2.1 m/s, este valor no tuvo un cambio notable en comparación con el 2020 (promedio: 2.2 m/s). En la serie de tiempo (**Figura 3.10a**), se observa una reducción en la velocidad del viento de julio hasta diciembre. En el análisis mensual, se determinó que diciembre tuvo la velocidad mínima con 1.64 m/s, mientras que abril y mayo registraron los máximos con 2.36 m/s (**Figura 3.10b**). En el patrón horario (**Figura 3.10c**), se observó que de 17:00 a 19:00 h se presentan vientos con mayor velocidad, mientras que de 07:00 a 09:00 h se registraron los mínimos (**Figura 3.10c**). Este comportamiento de la velocidad del viento es un patrón característico en la ZMCM, con intensidad débil en las primeras horas de la mañana e incremento gradual, junto con el aumento de temperatura en la superficie, ocasionado por la radiación solar. Esto genera un movimiento de las masas de aire y aproximadamente a las 18:00 h, se alcanza el máximo de velocidad de viento; después de esta hora, la velocidad desciende durante la noche.

En el promedio anual de la velocidad de viento por estación (**Figura 3.10d**), se observó que los sitios dentro de la zona urbana tuvieron una velocidad de viento de 1.7 a 2.5 m/s, mientras que las estaciones en la periferia tuvieron velocidades de viento de 1.5 m/s (INN) a 3.0 m/s (MPA). Este valor alto en MPA se relaciona con la altura de la estación, así como la zona en la que está ubicada, ya que se encuentra en el sureste, donde entran corrientes de viento hacia la ciudad.

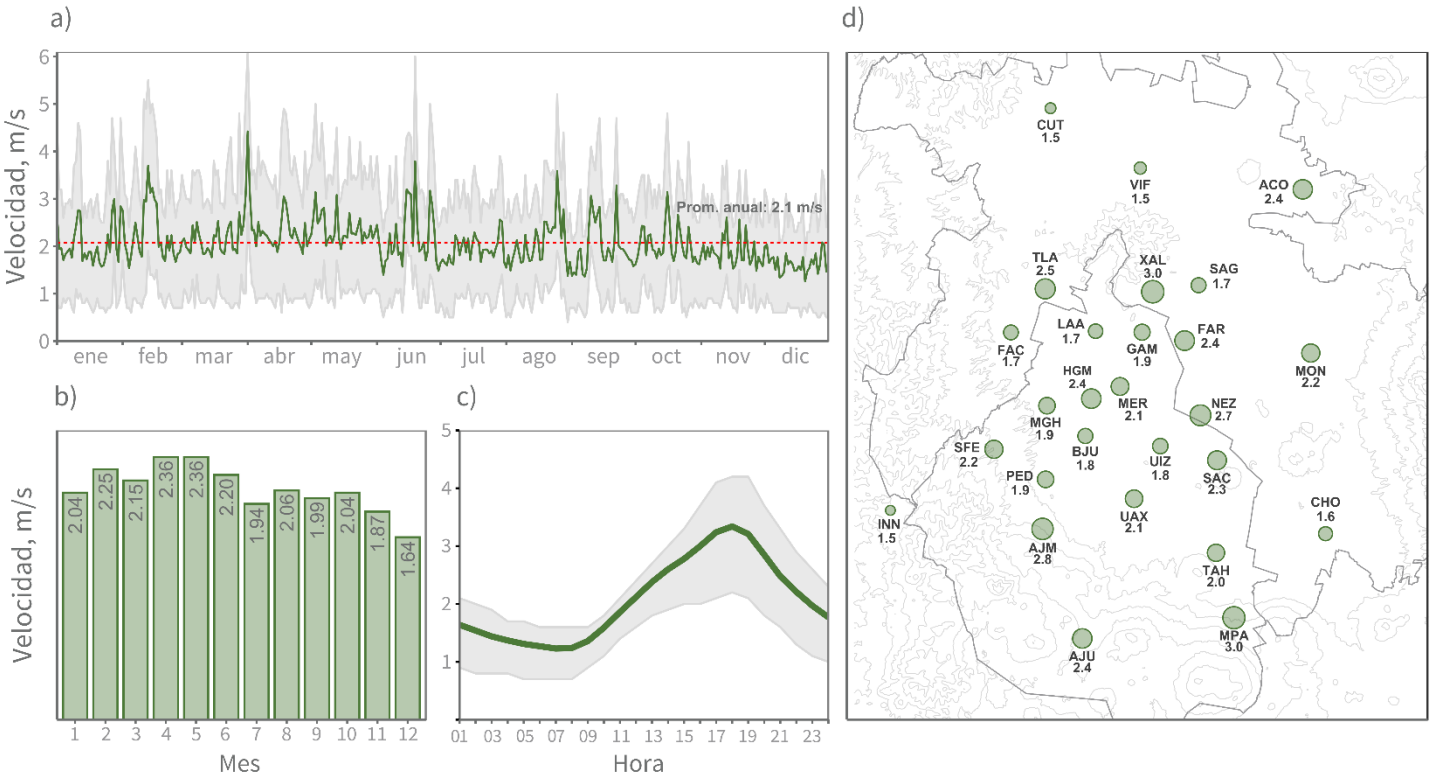


Figura 3.10. Comportamiento de la velocidad del viento en 2021. **a)** Serie de tiempo con el promedio diario (línea verde continua), máximo y mínimo (sombreado gris) y el promedio anual (línea roja punteada). **b)** Promedio mensual. **c)** Perfil horario, la línea verde es el promedio en cada hora y el sombreado gris es el percentil 25 y 75, respectivamente. **d)** Promedio anual (m/s) por estación.

Las anomalías de la velocidad del viento fueron calculadas con las estaciones TLA, FAC, VIF, MER, PED y SAG, las cuales cumplieron con los criterios establecidos en la metodología explicada en la sección de temperatura. Los resultados para velocidad de viento muestran que los meses de enero a mayo presentaron las anomalías positivas mayores, mientras que en junio, julio y noviembre fueron ligeramente superiores al período 2008-2019. Las anomalías negativas (valores inferiores al promedio 2008-2019) se presentaron en septiembre, octubre y diciembre, con la mayor en octubre. Es importante mencionar que los meses de julio a septiembre y diciembre, la velocidad del viento tuvo anomalías, pero su comportamiento fue muy cercano al período de referencia (Figura 3.11).

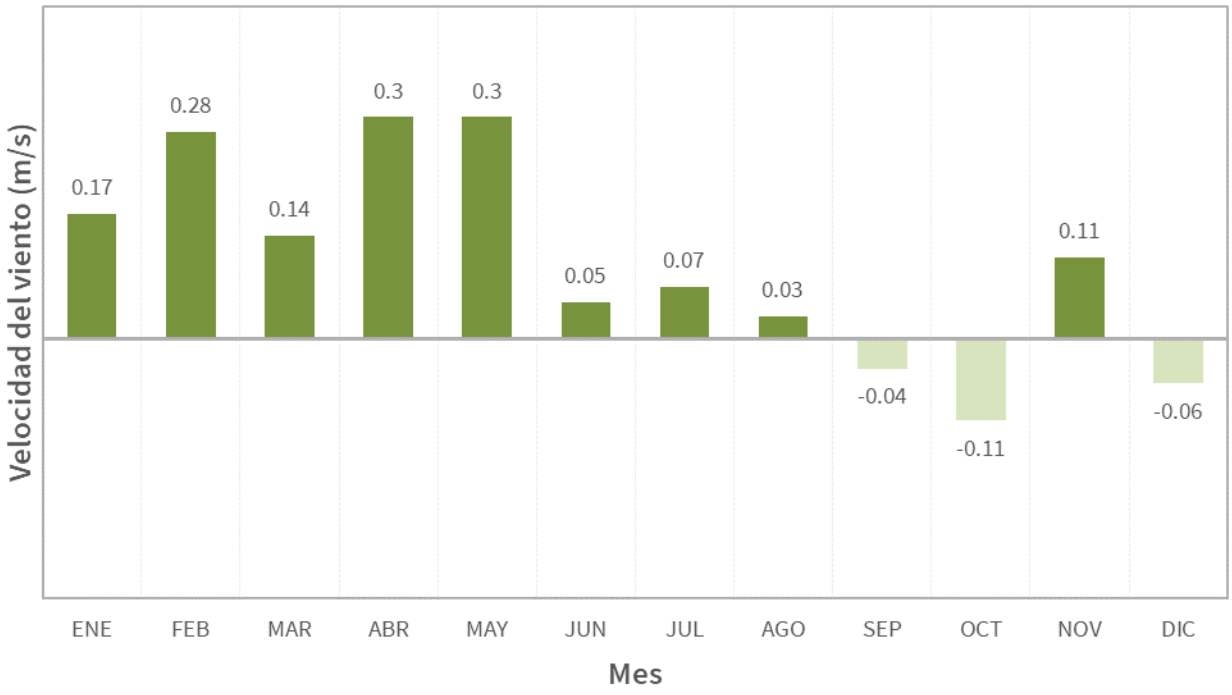


Figura 3.11. Anomalía mensual de la velocidad de viento en 2021, calculada con respecto a la media mensual del período 2008-2019 en las estaciones TLA, FAC, VIF, MER, PED, SAG.

PRESIÓN ATMOSFÉRICA

La presión atmosférica es la fuerza ejercida por una columna de aire sobre un punto específico, en la superficie terrestre o en otro nivel de altitud (AMS, 2020). Esta variable se mide con un instrumento llamado barómetro y se utilizan diferentes unidades como los hectopascales (hPa), milibares (mbar), atmósferas (atm) y milímetros de mercurio (mmHg). La presión es una variable relevante para la calidad del aire, ya que está relacionada con las características del viento (Lazaridis, 2010), lo cual puede favorecer el estancamiento o dispersión de contaminantes. Los cambios de presión atmosférica dependen de la temperatura y de la densidad de los gases (Hartmann, 2015), así como de otros factores meteorológicos.

La presión también depende de la altura, ya que en zonas de mayor altitud como la CDMX (2,240 msnm), la presión es menor que al nivel del mar. Durante 2021, la presión en la ZMCM tuvo un promedio de 584.9 mmHg (**Figura 3.12a**), similar al de 2020 (585 mmHg). Este valor se calculó con los sitios en la parte baja de la cuenca, ya que la altura de las estaciones influye en la medición de la presión. En los datos mensuales, el mínimo fue en febrero y abril con 584 mmHg, mientras que el máximo ocurrió en noviembre con 586.1 mmHg (**Figura 3.12b**). El perfil horario presentó los máximos de 09:00 a 11:00 h y de 22:00 a 23:00 h, los mínimos se presentaron de 16:00 a 18:00 h (**Figura 3.12c**).

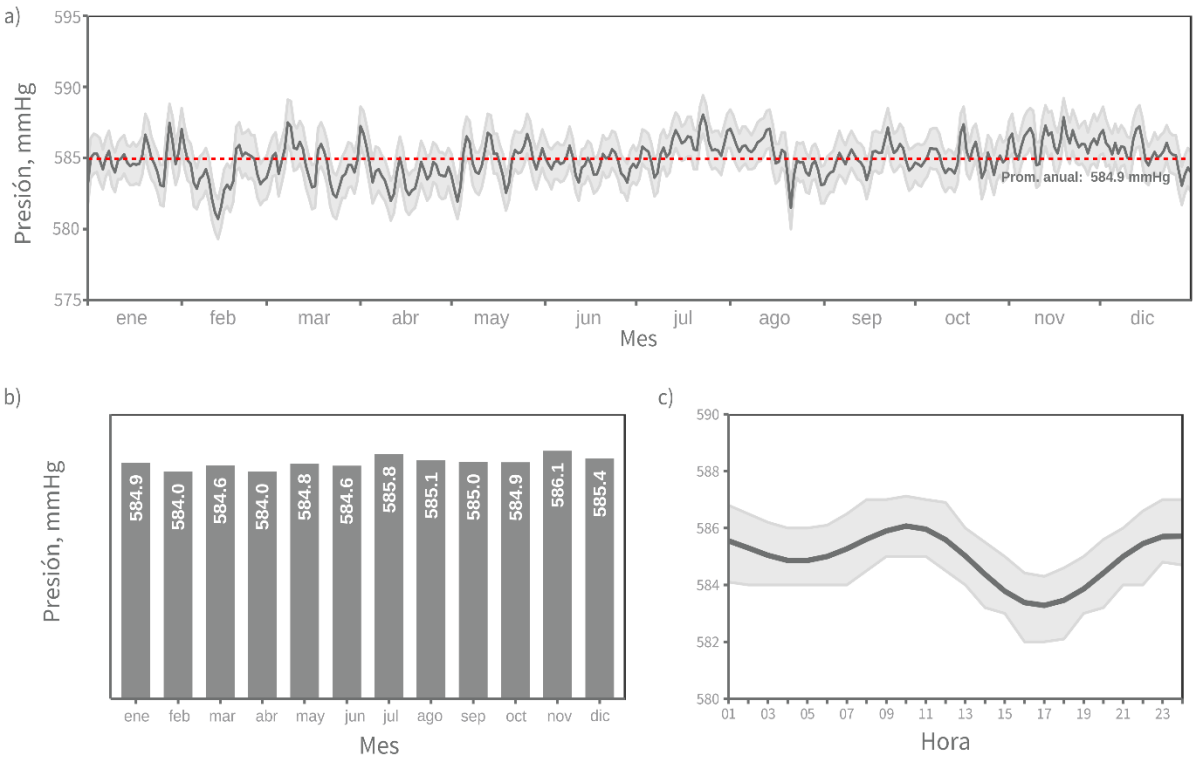


Figura 3.12. Comportamiento de la presión atmosférica en 2021. **a)** Serie de tiempo con el promedio diario (línea gris continua), máximo y mínimo (sombreado gris) y el promedio anual (línea roja punteada). **b)** Promedio mensual. **c)** Perfil horario, la línea gris es el promedio en cada hora y el sombreado gris es el percentil 25 y 75, respectivamente.

El cálculo de anomalías de la presión atmosférica se realizó con un periodo menor (2012-2019) que las demás variables, debido a la suficiencia de datos; además, las estaciones que cumplieron con los criterios establecidos en la metodología, solamente se utilizaron dos estaciones TLA y MER (**Figura 3.13**).. En los resultados se observó un comportamiento superior al periodo de referencia (2012-2019) en casi todos los meses del 2021, excepto en enero y febrero. La anomalía positiva más alta fue en octubre, lo cual estuvo asociado a la circulación de 500 hPa con anomalías positivas de altura geopotencial sobre el oriente de Canadá, Estados Unidos, México y otras partes del hemisferio norte, esto también influyó fuertemente en los patrones de temperatura en superficie. Adicionalmente, en octubre se presentó un sistema de alta presión semipermanente en el océano Pacífico norte (SMN, 2021).

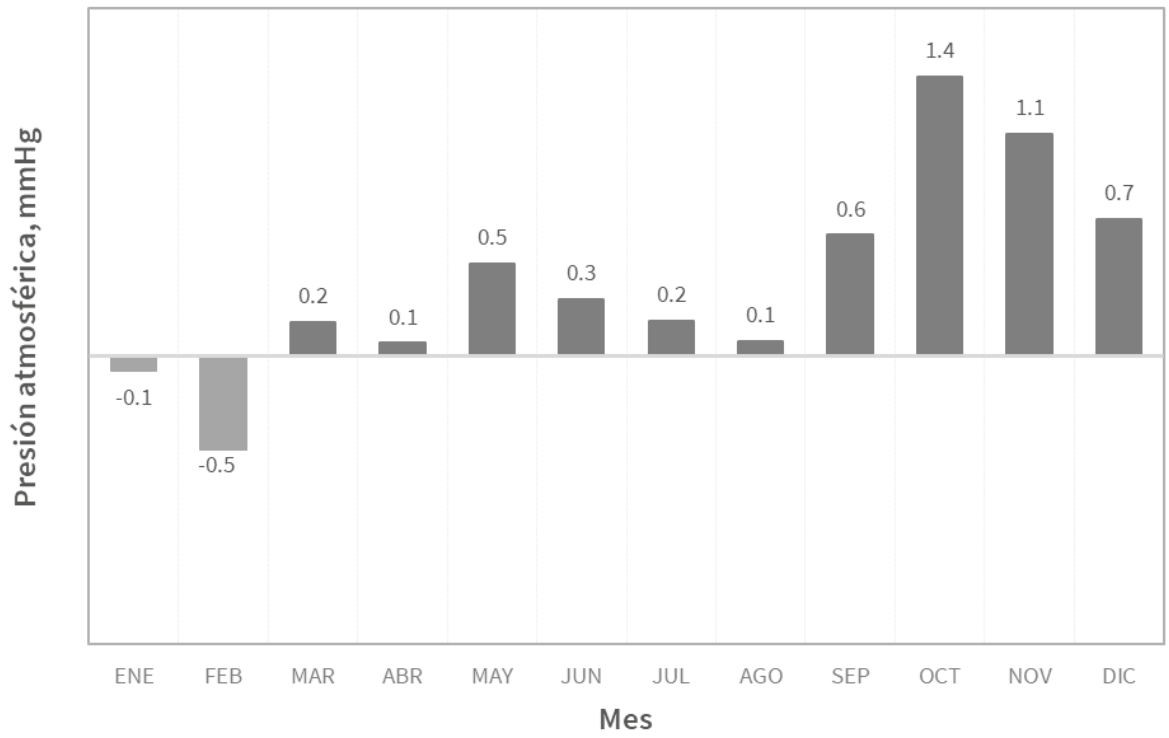


Figura 3.13. Anomalía mensual de la presión atmosférica en 2021 calculada con respecto a la media mensual del período 2012-2019 en las estaciones TLA y MER.

RADIACIÓN SOLAR ULTRAVIOLETA

La radiación solar es la energía emitida por el Sol, que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas. Esta energía se genera por reacciones de fusión nuclear de hidrógeno en el núcleo del Sol y es emitida por su superficie. La vida en la Tierra, así como los procesos biológicos, químicos y físicos en el planeta dependen de esta energía, y en términos de calidad del aire, la radiación solar determina la dinámica de los procesos atmosféricos y del clima a largo plazo (IDEAM, 2023).

El Sol emite energía en forma de radiación de **onda corta**, la cual se debilita cuando atraviesa la atmósfera, debido a la presencia de las nubes y se absorbe por las moléculas de gases o de partículas en suspensión. Después de atravesar la atmósfera, la radiación solar alcanza la superficie terrestre y oceánica, donde se absorbe o refleja. Finalmente, la superficie devuelve la energía hacia el espacio exterior en forma de radiación de **onda larga** (IDEAM, 2023).

La medición de la radiación solar tiene aplicaciones en diversas áreas, como en ingeniería, arquitectura, agricultura, ganadería, salud y meteorología. Uno de los usos más destacados es como fuente alternativa de energía para la generación de electricidad, en la implementación de sistemas de calentamiento de agua, en el diseño de edificios e infraestructura, para el monitoreo del crecimiento de plantas, la deshidratación de alimentos, en el análisis de la evaporación e irrigación de agua y en el sector salud para algunos tratamientos curativos. También es un factor importante dentro de los modelos de calidad del aire usados para la predicción de contaminantes, del tiempo y el clima (OMS, 2003).

Tipos de radiación solar:

La radiación solar se puede clasificar de acuerdo a la forma en la que llega a la Tierra (**Figura 3.14**):

- **Radiación solar directa**. Este tipo de radiación traspasa la atmósfera y alcanza la superficie de la Tierra sin sufrir desviaciones en su trayectoria.
- **Radiación solar difusa**. Esta radiación alcanza la superficie terrestre después de tener desviaciones en su trayectoria, por ejemplo, por los gases presentes en la atmósfera.
- **Radiación solar reflejada.** Es la fracción de radiación solar que es reflejada por la superficie terrestre, en un fenómeno llamado **efecto albedo**.

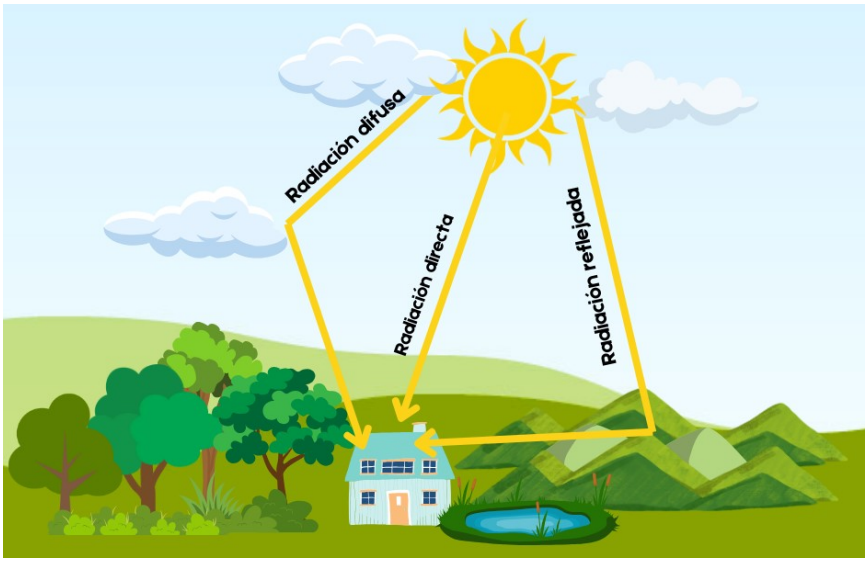


Figura 3.14. Componentes de la radiación solar y los procesos de dispersión, difusión y reflexión que ocurren al ingresar a la atmósfera.

La radiación también se puede clasificar por los **tipos de rayos**:

- **Rayos infrarrojos (IR).** Tienen mayor longitud de onda que la luz visible, emiten calor y son desprendidos por cualquier cuerpo con temperatura mayor a 0 K.
- **Rayos visibles (VI)**. Emiten luz y pueden ser percibidos por el ojo humano como colores (rojo, naranja, amarillo, verde, cian, azul y violeta).
- **Rayos ultravioleta (UV)**. Son invisibles al ojo humano; sin embargo, son los que causan más daño en la piel (quemaduras, manchas, arrugas). Se dividen en tres subcategorías:
  - ➔ **Ultravioleta (UV-A).** Son aquellos que atraviesan la atmósfera con facilidad y alcanzan la superficie terrestre.
  - ➔ **Ultravioleta B (UV-B).** Tienen mayores dificultades para traspasar la atmósfera. Aun así, llegan a la superficie terrestre y son los que pueden producir daños más graves en la piel.
  - ➔ **Ultravioleta C (UV-C).** Este tipo de rayos no consiguen atravesar la atmósfera, ya que son absorbidos por la capa de ozono.

En la atmósfera, los gases como el ozono, vapor de agua, oxígeno y dióxido de carbono, absorben toda la radiación UV-C y el 90% de la UV-B, mientras que, la UV-A es ligeramente absorbida. Debido a esto, la mayoría de la radiación UV que alcanza la superficie terrestre está constituida de radiación UV-A (95%) y UV-B (5%). Esta radiación UV que llega a la troposfera, es el motor de los procesos fotoquímicos en las capas bajas de la atmósfera. Los fotones en la longitud de onda UV, tienen la capacidad de romper moléculas estables en fragmentos muy reactivos (fotólisis) e iniciar reacciones en cadena (IDEAM, 2023).

En los seres humanos, las cantidades pequeñas de radiación UV son necesarias para producir vitamina D; sin embargo, las altas dosis pueden ocasionar patologías oculares, así como efectos graves en la piel, por ejemplo, envejecimiento prematuro, arrugas, quemaduras y cáncer de piel. El bronceado de la piel que ocurre por la exposición a la radiación solar, es producción de melanina que es un mecanismo de defensa natural de la piel contra el daño de los rayos UV. El riesgo de la sobreexposición a la radiación ha incrementado en los últimos años debido a la disminución del ozono estratosférico, el cual interviene como filtro contra la radiación (OMS, 2003).

La radiación UV está presente de manera natural y artificial (p. ej. en la medicina, la industria, para la desinfección o con fines cosméticos), por lo que todos estamos expuestos a ella. Los niveles de radiación UV que se registran dependen de los siguientes factores:

- **Elevación del Sol.** A mayor altura del Sol en el cielo, más radiación ultravioleta. Los niveles varían en función de la hora del día y la época del año.
- **Latitud.** La cercanía con el ecuador, conlleva a valores más altos de radiación UV.
- **Altitud.** La radiación ultravioleta incrementa con la altitud, ya que el aire es menos denso y hay menor absorción.
- **Nubosidad.** La radiación ultravioleta es más alta en cielos despejados; sin embargo, también puede ser alta con nubosidad.
- **Ozono.** El O_3 absorbe parte de los rayos UV. En zonas donde hay menos O_3, una mayor cantidad de radiación alcanza la superficie terrestre.
- **Reflexión.** Las superficies reflectantes, como el agua, arena y la nieve aumentan el nivel de radiación UV.
- **Cambio climático.** Se han hecho predicciones sobre los efectos en los niveles de radiación ultravioleta que llega a la superficie de la Tierra, por ejemplo, con la variación de la cantidad de ozono y la nubosidad.

La radiación solar se mide con un sensor de radiación o piranómetro, que se sitúa orientado al sur y en un lugar libre de sombras. Las unidades de medición son de potencia, vatios por metro cuadrado (W/m^2). En las estaciones meteorológicas, los datos se toman en intervalos de 10 minutos, de una hora o de 24 horas para establecer medias. Para la conversión de la radiación solar a unidades de energía, los datos en W/m^2 se multiplican por la cantidad de segundos dentro de diez minutos (600 s), 60 minutos (3,600 s) o 24 horas (86,400 s) y el resultado será en julios por metro cuadrado (J/m^2).

La Ciudad de México recibe una cantidad importante de radiación solar debido a su latitud (19°40' N) y altitud (~2,240 msnm). De acuerdo con las mediciones de la REDMET en 2021, el promedio anual de la radiación UV-A y en UV-B fue de 1.765 y 0.075 W/m^2, respectivamente. La magnitud de la radiación UV-B fue menor que la de UV-A; sin embargo, la UV-B es de mayor energía y, en consecuencia, provoca más daño en la salud humana, incluso en valores bajos de intensidad.

Durante el año, la intensidad de la radiación varía con la declinación solar, es máxima durante el verano y mínima en los meses de invierno (**Figura 3.15b**). En el transcurso del día, la intensidad de la radiación UV depende principalmente del ángulo de elevación del Sol, ya que aumenta a medida que éste asciende y es máxima cuando el Sol alcanza el punto más alto en el cielo, entre las 12:00 y 14:00 h (**Figura 3.15c**).

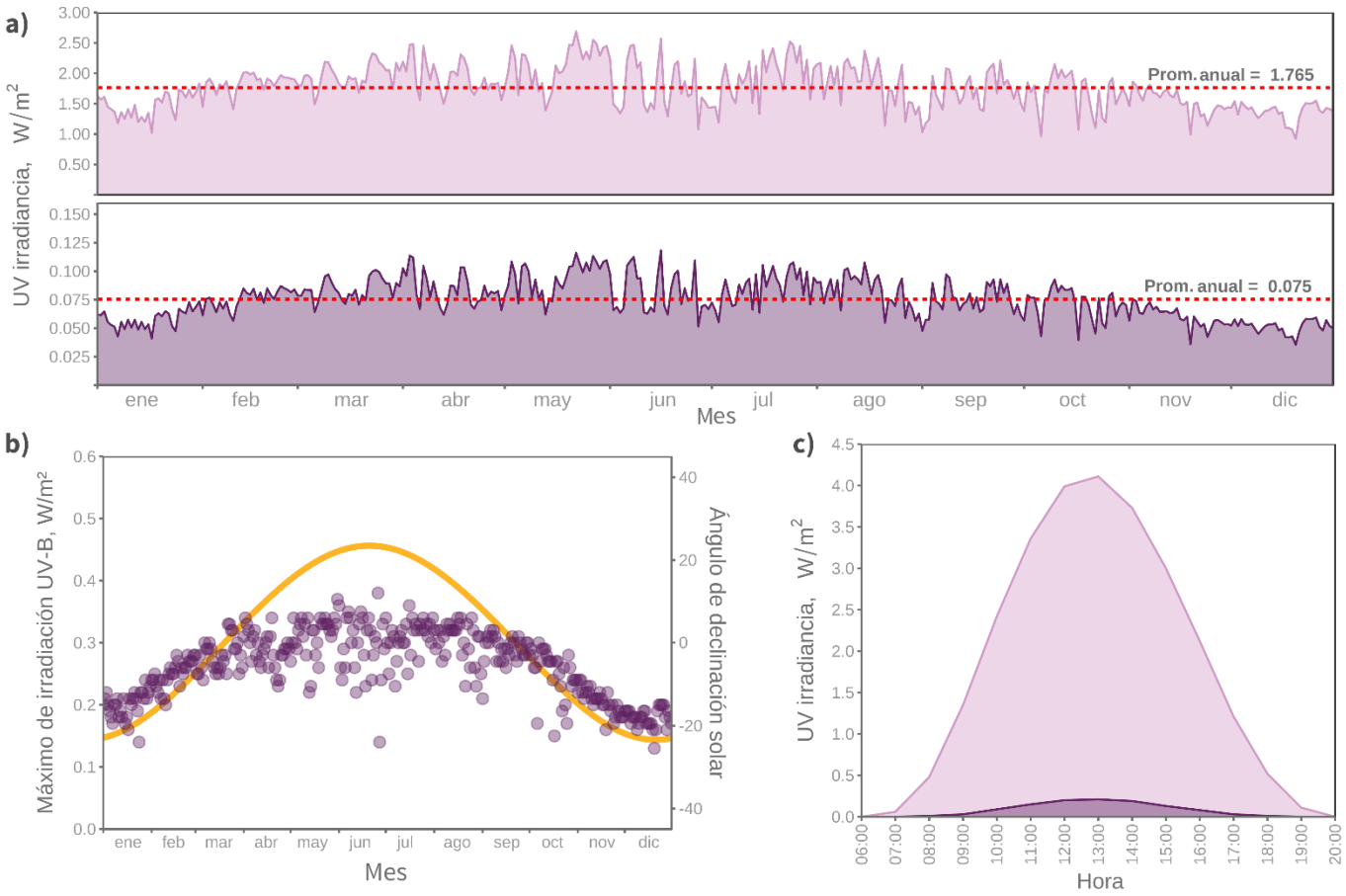


Figura 3.15. Comportamiento de la radiación UV-A y UV-B en 2021. **a)** Promedio diario de la irradiancia UV-A (superior) y UV-B (inferior) de 06:00 a 20:00 h. La línea punteada es el promedio anual. **b)** Comparación entre la intensidad máxima diaria de UV-B (círculos) y el ángulo de declinación solar (línea amarilla). **c)** Perfil diurno de UV-A (morado claro) y UV-B (morado oscuro).

ÍNDICE DE RADIACIÓN SOLAR UV (IUV)

En 1992, científicos de la oficina de Medio Ambiente de Canadá desarrollaron el índice UV, por lo que fue el primer país del mundo que comunicó las previsiones sobre los niveles de UV para el día siguiente. Otros países siguieron el ejemplo con sus propios índices UV, como Estados Unidos en 1994. Al inicio, los métodos de cálculo del índice variaban en cada país, y después el IUV fue estandarizado a nivel internacional en 2003, por la Organización Mundial de la Salud (OMS), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y la Comisión Internacional para la Protección contra las Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP, por sus siglas en inglés). Este índice UV internacional sustituyó los métodos regionales que no eran comparables entre sí y ya especifica un método de cálculo uniforme, además proporciona una escala estandarizada con colores y los gráficos para medios impresos (Fioletov et al., 2010).

El índice UV está definido como una medida de la intensidad de la radiación ultravioleta solar en la superficie terrestre. El IUV proporciona información sobre el riesgo de lesiones cutáneas producidas por la radiación solar, en cada lugar y momento del día, con la finalidad de adoptar medidas protectoras. En la escala del IUV, un valor más alto, significa un riesgo mayor de padecer daños en la piel y ojos, además se necesitará de menos tiempo de exposición para causar efectos. Es importante mencionar que cuando el IUV alcanza un valor de 3 o superior, ya se recomienda tomar medidas para protegerse del Sol (Figura 3.16). El objetivo del índice UV es ayudar a las personas a cuidarse eficazmente de la radiación y no sufrir las consecuencias de la sobreexposición.

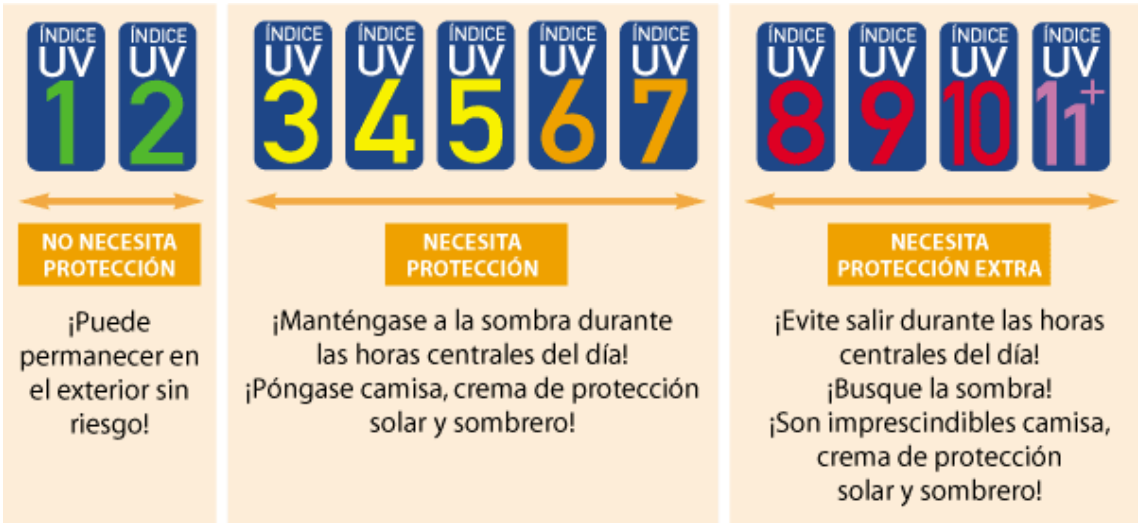


Figura 3.16 Sistema de protección solar recomendado por la OMS. Fuente: Índice UV solar mundial (OMS, 2003).

En la ZMCM, el índice IUV se calcula con la intensidad de la radiación UV-B y se reporta cada 10 minutos durante el día con el objetivo de proporcionar información casi en tiempo real. Para el análisis de IUV presentado en esta sección, se calcularon los **promedios horarios** del IUV y con estos, se obtuvo el valor máximo diario del IUV. La escala de colores utilizada es un medio visual para comunicar la información sobre el IUV; está escala y las recomendaciones por color, provienen de la guía de la OMS (**Figura 3.14**).

La intensidad de la radiación UV en la ZMCM durante 2021, presentó valores máximos de IUV superiores a 10, esto significa un incremento del riesgo en la piel sin protección para una exposición menor a 30 minutos. En el comportamiento anual, los máximos de IUV se registraron de marzo hasta septiembre, con valores de 11 y 11+, mientras que los mínimos fueron enero, noviembre y diciembre, con promedios entre 7 y 8; por otro lado, febrero y octubre presentan un IUV promedio de 10. El momento del día con los valores máximos del índice (IUV de 11+) y por lo tanto, mayor riesgo, fue de las 11:00 a 16:00 h.

Durante 2021, el IUV no presentó días con intensidad **BAJA** y registró dos días en la categoría **MODERADA**: uno en enero y uno en diciembre. Se contabilizaron 41 días con IUV en intensidad **ALTA**, los cuales ocurrieron durante enero, octubre, noviembre y la mayoría en diciembre, así como un día en junio; para la categoría **MUY ALTA** hubo un total de 119 días, con más registros dentro de la temporada seca-fría (noviembre a febrero) y algunos dispersos en otros meses del año; finalmente, en el IUV **EXTREMADAMENTE ALTO** se registraron 203 días, de los cuales se contabilizaron más días en mayo, julio y septiembre. Al comparar esta última categoría con lo obtenido en 2020, se registró un decremento del 9 %. Los valores más altos del índice (IUV = 15), tuvieron un total de 3 días en el 2021, uno por mes, de mayo a julio (**Figura 3.17**).

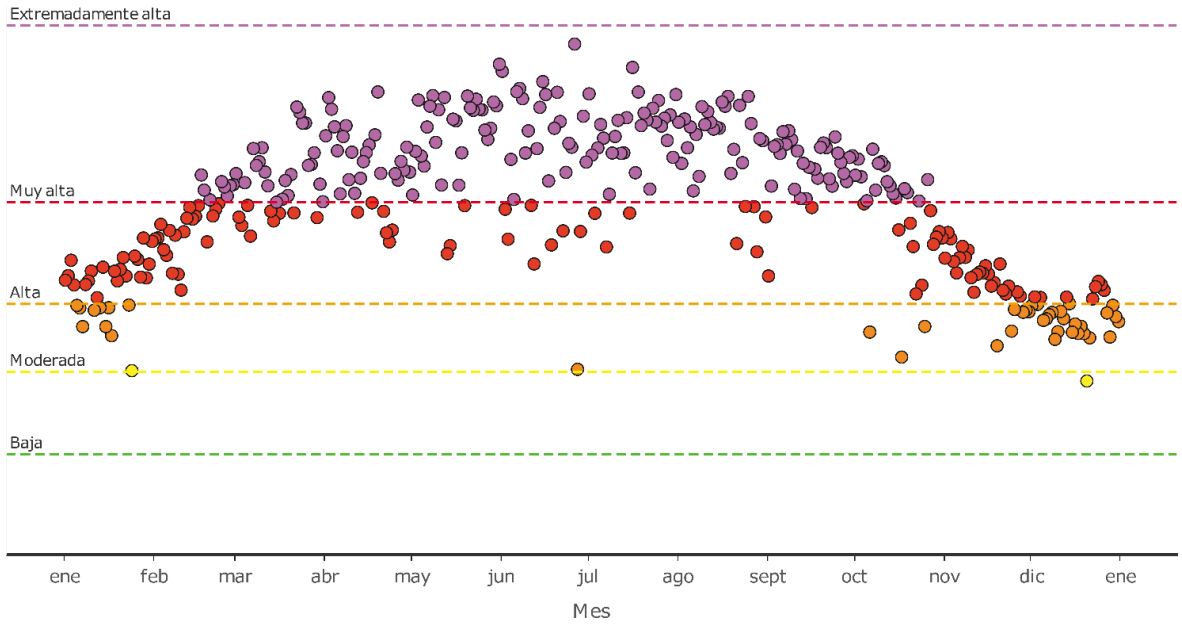
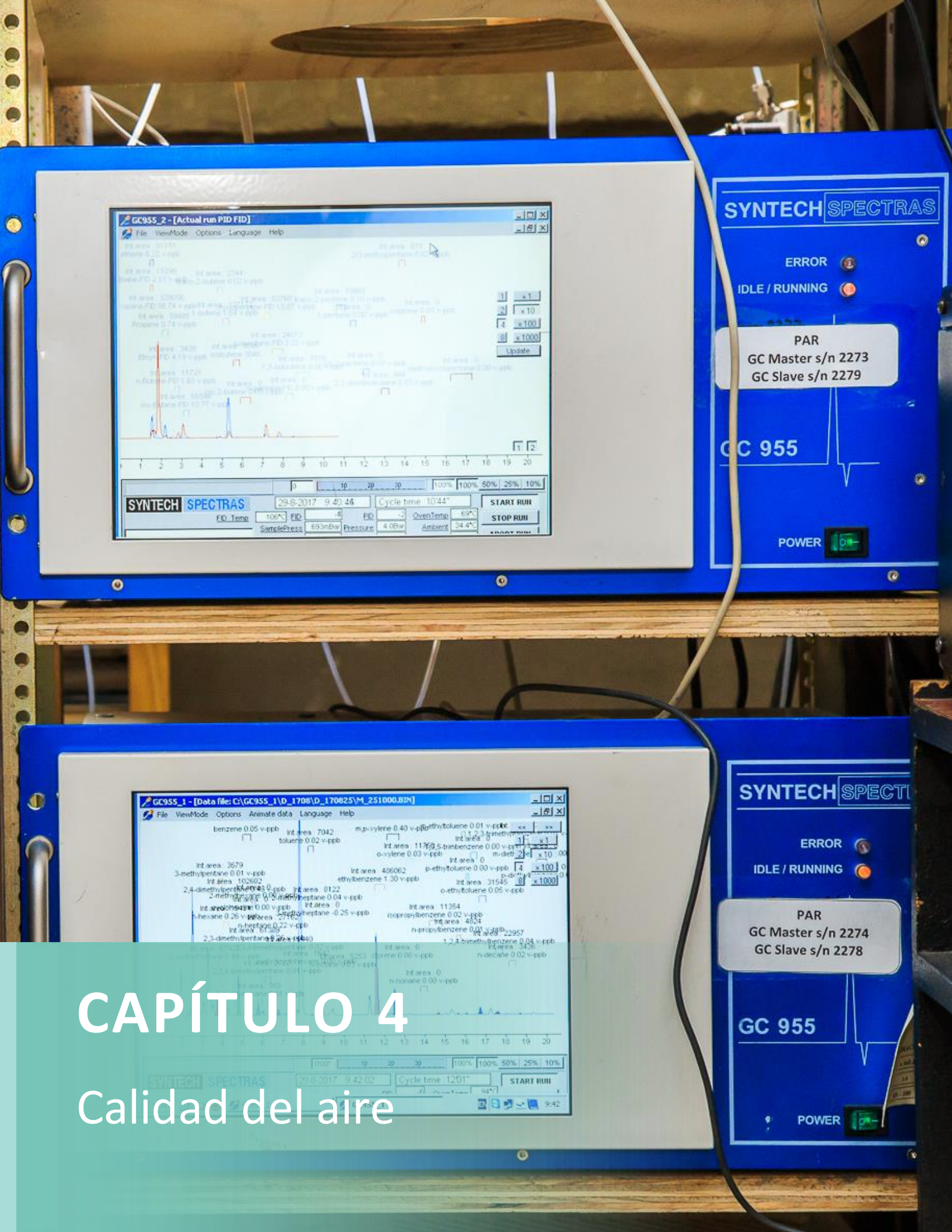


Figura 3.17 Comportamiento del Índice de Radiación Solar (IUV) durante 2021



CAPÍTULO 4

Calidad del aire

CALIDAD DEL AIRE

La contaminación atmosférica es una grave amenaza para la salud y el clima, desde el smog suspendido sobre las ciudades hasta el humo en los hogares. La contaminación del aire, en exteriores e interiores, se puede definir como la presencia de compuestos químicos, físicos o biológicos que alteran las características naturales de la atmósfera. Los contaminantes más preocupantes para la salud pública son los llamados **contaminantes criterio**, que incluye las partículas suspendidas (PM), el monóxido de carbono (CO), el ozono (O_3), el dióxido de nitrógeno (NO_2) y el dióxido de azufre (SO_2). La contaminación del aire exterior y de interiores, aumenta el riesgo de padecer accidentes cerebrovasculares, cardiopatías, cáncer de pulmón, así como enfermedades respiratorias agudas y crónicas (OMS, 2021).

Los datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS) estiman que el 99 % de la población mundial respira aire contaminado, que supera los límites recomendados por las guías de la OMS. De acuerdo con la OMS, cada año 4.2 millones de muertes se atribuyen a la contaminación del aire ambiente, mientras que 3.2 millones de personas mueren prematuramente a causa de la contaminación del aire doméstico; además, el nivel de riesgo para la salud relacionado con la calidad del aire varía entre las poblaciones, ya que es mayor en los países de ingresos medianos y bajos (OMS, 2021).

Las personas que viven en países de ingresos bajos y medios son más vulnerables, debido a que los niveles de contaminantes a los que están expuestos cada día son más altos y esto aumenta la tasa de prevalencia de enfermedades (por ejemplo, el asma), que son directamente afectadas por la exposición a la contaminación del aire. Existen grupos de población más vulnerable a la contaminación, como aquellas personas que viven en barrios marginales o cerca de carreteras y caminos transitados, también afecta a las personas que realizan ocupaciones como policías de tránsito, vendedores ambulantes, trabajadores de limpieza en calles, entre otros. Así mismo, dentro de los hogares más desfavorecidos, las mujeres, los niños y ancianos tienen mayor riesgo en salud ocasionados por la contaminación en interiores. En la mayoría de estos países, las mujeres y los niños realizan las tareas domésticas relacionadas con el suministro de energía para el hogar, incluida la recolección y el procesamiento de combustible, el cuidado del hogar y la preparación de alimentos; en consecuencia, estos grupos de población tienen mayores tasas de exposición a partículas y otros contaminantes emitidos por estufas y fogatas (WHO, 2016).

La calidad del aire está directamente relacionada con el clima del planeta y los ecosistemas de todo el mundo. Diversas fuentes de contaminación atmosférica (por ejemplo, la quema de combustibles fósiles, incendios forestales), también emiten gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4), entre otros. Es importante mencionar que todos los contaminantes del aire (gases de efecto invernadero, aerosoles, contaminantes criterio), tienen efectos negativos en el clima. Existe evidencia considerable de la relación entre la contaminación del aire y el cambio climático, con diversos estudios que van en aumento. En consecuencia, las políticas orientadas a reducir la contaminación del aire son una estrategia beneficiosa para el clima y la salud, ya que con el vínculo que existe entre la contaminación y el cambio climático, se pueden combinar estrategias y buscar soluciones que favorezcan a la población mundial, ya que con esto se puede reducir la carga de morbilidad y mortalidad, así como mitigar el cambio climático a corto y largo plazo (ONU, 2022).

La medición y monitoreo de los contaminantes es el factor más importante para poder conocer el comportamiento, tendencia y cambios en los niveles de contaminantes. Sin embargo, de acuerdo con el Programa para el Medio Ambiente de la ONU (PNUMA), solamente el 37 % de los países tienen como requisito legal, contar con una red de monitoreo de contaminantes. Por esta razón la PNUMA advierte que los gobiernos deben tomar medidas urgentes para fortalecer la capacidad de vigilancia de los contaminantes atmosféricos y así mitigar la problemática de calidad del aire. Un sistema de monitoreo atmosférico proporciona información fundamental para entender los efectos de la contaminación en las personas, los lugares donde habitan y el planeta. Con esta información, los tomadores de decisiones pueden identificar los puntos críticos de la contaminación del aire, en consecuencia, se pueden aplicar medidas para proteger y mejorar el bienestar humano y ambiental (PNUMA, 2021).

La Ciudad de México y municipios conurbados del Estado de México tienen el Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT), el cual se conforma de 44 sitios de monitoreo distribuidos en 4 subsistemas (**Figura 4.1**), en el **Anexo 1** de este informe anual se pueden consultar los mapas con la distribución de estaciones para cada subsistema. El SIMAT se considera como una estrategia ambiental para conocer el estado de contaminación atmosférica en el Valle de México, con lo que se pueden elaborar programas eficaces de control, además se puede evaluar el cumplimiento de las normas de salud ambiental, revisar la efectividad de las estrategias de control aplicadas a través de los años, analizar la tendencia a largo plazo, evaluar riesgos para la salud humana, estudiar los impactos en ecosistemas y edificaciones, analizar la contribución de las fuentes de emisión, para la implementación y validación de los modelos de dispersión y de pronóstico, entre otras aplicaciones.

En este capítulo se presenta el análisis de los contaminantes criterio en forma de gases (SO_2, NO_2, CO y O_3) y partículas suspendidas (menores a 10 micrómetros PM_{10}, gruesas -$PM_{10-2.5}$-y finas $PM_{2.5}$) para el 2021. Es importante mencionar que la calidad del aire de la ZMCM tuvo cambios importantes, derivados de la pandemia COVID-19, lo cual se puede consultar en el informe anual del 2020; sin embargo, en el año 2021, continuó el impacto de la pandemia en los sectores académico, laboral y económico, debido a que no se reanudaron todas las actividades como estaban antes de la pandemia, esto debido a las olas de contagio de las variantes del virus COVID-19 (Delta y Ómicron) en los primeros meses del año y a finales de julio hasta septiembre (SSA, 2021).

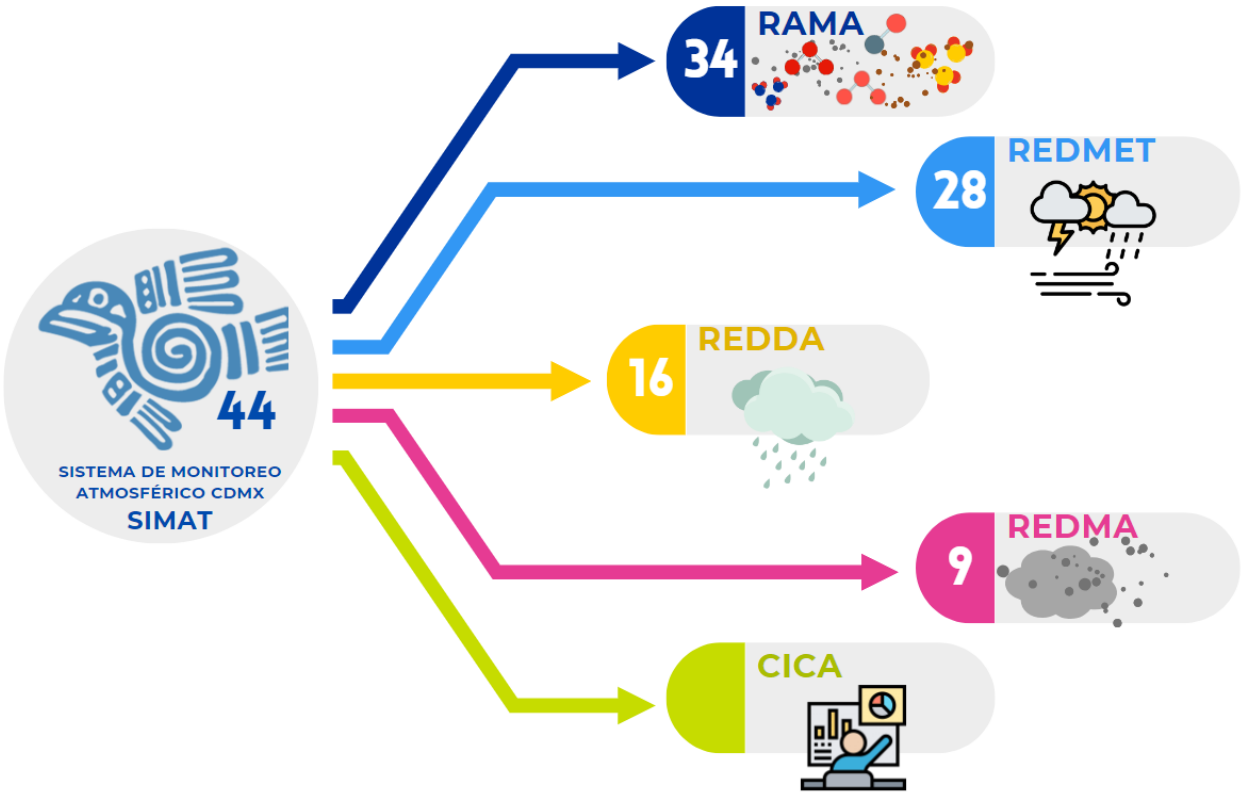
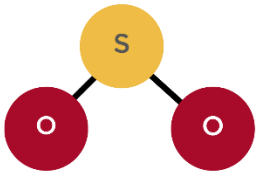


Figura 4.1. Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. Red Automática de monitoreo atmosférico (RAMA) : 34 sitios; Red de meteorología y radiación solar (REDMET):28 sitios; Red de depósito atmosférico (REDDA):16 sitios; Red manual de partículas (REDMA) :9 sitios; Centro de Información de la Calidad del Aire (CICA).

DIÓXIDO DE AZUFRE (SO_2)



Descripción

- **Nombre**: Dióxido de azufre
- **Fórmula molecular**: SO_2
- **Sinónimos**: óxido sulfuroso, óxido de azufre, anhídrido sulfuroso

Propiedades físicas

- Gas incoloro. Olor fuerte y sofocante.
- **Punto de fusión**: -75.51 °C
- **Punto de ebullición**: -10.06 °C
- **Gravedad específica**: 0.00293
- **Densidad de vapor**: 2.26

Propiedades químicas

Gas no inflamable. El SO_2 se puede oxidar a trióxido de azufre (SO_3) que se disuelve en agua para producir ácido sulfúrico (H_2SO_4)

Efectos en la salud

La exposición repetida y prolongada a niveles moderados puede causar inflamación del tracto respiratorio, sibilancias y daño pulmonar. También es dañino para los sistemas reproductivos de animales de experimentación y ha causado cambios en el desarrollo de los recién nacidos.

En la Ciudad de México y su área metropolitana, el dióxido de azufre (SO_2), es generado principalmente por el uso de combustibles fósiles en la industria y los vehículos, los cuales emiten 2,039 toneladas anuales (SEDEMA, 2023).

El promedio anual de la concentración de SO_2, calculado para todas las estaciones de monitoreo con suficiencia anual del 70% fue de 2.9 ppb, este valor es el mínimo histórico, que en comparación con 2019, se tuvo una reducción del 12%. En los sitios ubicados dentro de la Ciudad de México (CDMX), el promedio fue de 2.7 ppb, mientras que en los municipios conurbados del Estado de México (EDOMEX) fue de 3.2 ppb. Los promedios más altos se registraron en las estaciones del norte y centro de la zona metropolitana (**Figura 4.2**), lo cual se relaciona con el transporte regional desde el corredor industrial Tula-Tepeji, ubicado a 60 km al noreste de la CDMX.

En 2021, las concentraciones máximas se registraron en los meses de la temporada seca-fría (noviembre a febrero); sin embargo, durante febrero y marzo se registraron los promedios mensuales más altos con 5.8 y 5.2 ppb, respectivamente. Este incremento fue consecuencia de las tormentas invernales registradas en Texas del 10 al 11 y del 13 al 17 de febrero, que provocaron congelamiento en las líneas de gas natural, esto derivó en falta de energía eléctrica en Texas (Penney V., 2021), por lo que el gobierno de Texas prohibió las exportaciones de gas natural. México depende del gas natural de Texas, ya que 60 % de la generación eléctrica de nuestro país requiere del gas natural y alrededor del 70 % de este consumo se cubre con importaciones de Estados Unidos (El País, 2021a).

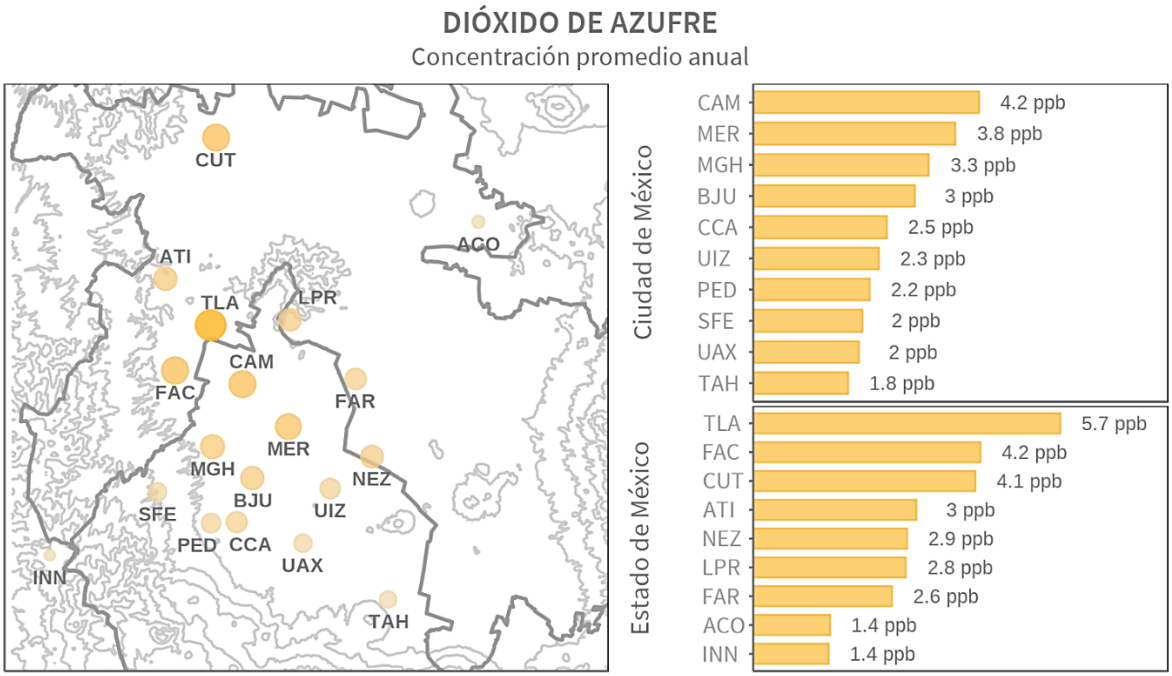


Figura 4.2. Promedio anual de SO_2 por sitio de monitoreo. **a)** En el mapa (izquierda) se presenta la ubicación de la estación, el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del promedio anual y **b)** las gráficas de barras (derecha) corresponden al valor del promedio anual dividido por entidad.

Este suceso en Texas hizo que el gobierno mexicano decidiera usar combustóleo y diésel para operar las plantas hidroeléctricas, fotovoltaicas y termoeléctricas, lo que cubrió parcialmente la demanda energética del país durante la emergencia (El País, 2021b). Esta decisión se reflejó en las concentraciones altas que se registraron del 19 al 21 de febrero, aunado a la época de mayor frecuencia de inversiones térmicas, también en marzo se observaron niveles altos de este contaminante (**Figura 4.3a**).

El perfil horario del SO_2 en 2021 (**Figura 4.3b**), tuvo un comportamiento variable entre estaciones y de manera general, presentó un perfil unimodal con máximos alrededor de las 10:00 h. En la mayoría de los sitios se observó un incremento de 08:00 a 10:00 h y decrece a partir de las 11:00 h. En 2021, las estaciones TLA, CAM y MER presentaron valores elevados durante la madrugada, con incrementos de las 22:00 h a las 07:00 h, esto sucedió en los días con las concentraciones altas en febrero por el uso de combustóleo y diésel. El sitio INN tuvo un patrón horario completamente diferente al resto de las estaciones, ya que presentó el incremento a las 10:00 h y se mantuvo prácticamente constante, con un máximo a las 16:00 h y decrece a las 21:00 h; esto se relaciona con el transporte del SO_2 desde el noroeste. El patrón se determinó con el Sistema de Pronóstico de la CDMX (AQFS-CDMX), el cual muestra la trayectoria de la emisión proveniente de la zona de Tula y logra llegar al sur de la ZMCM.

En el análisis de la tendencia del SO_2 desde 1995 al 2021 (**Figura 4.3c**), muestra que a partir del año 2010 se presentó el último decremento notable y en los siguientes años, la tendencia es prácticamente constante hasta 2020 y 2021, que se observa un ligero decremento, especialmente en 2021, que al comparar estos años con 1995, se determinó una reducción del 71 % en el ajuste del LOESS[1].

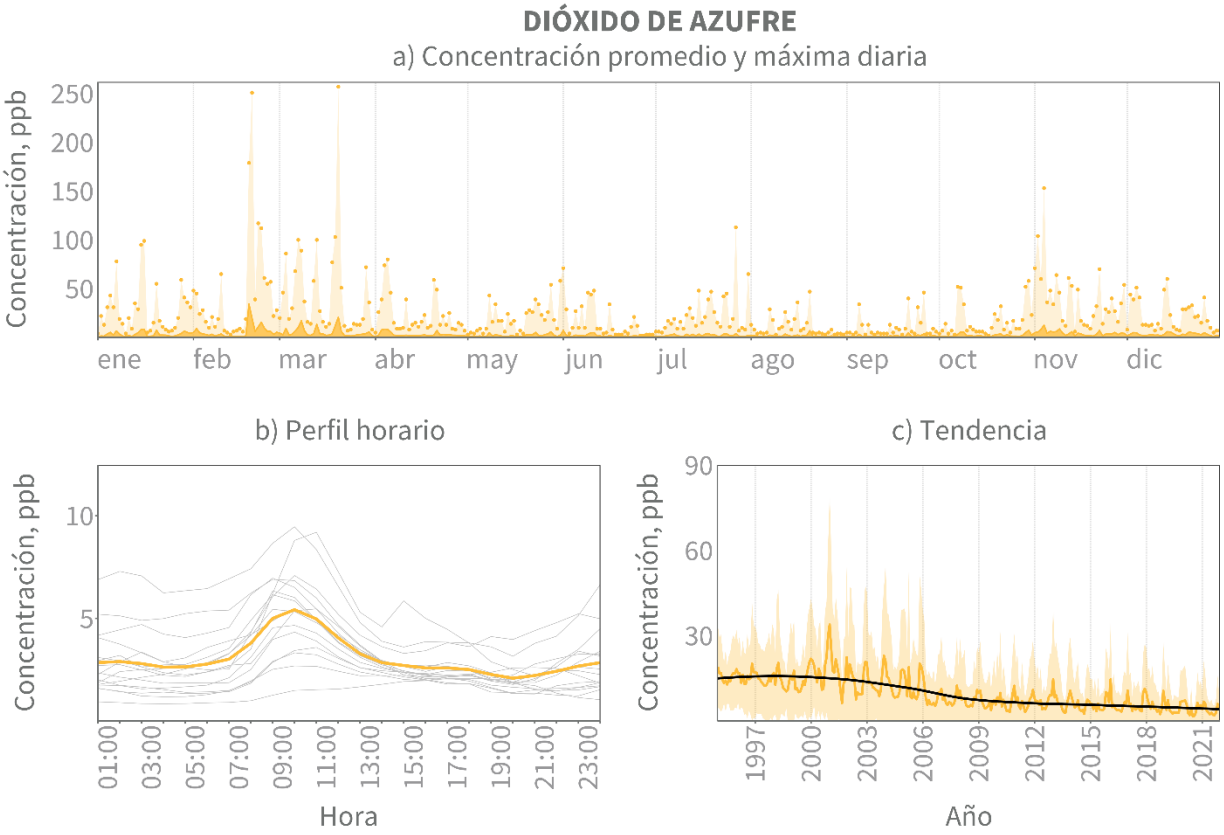
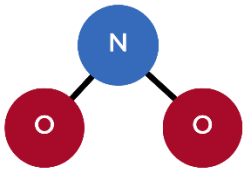


Figura 4.3. Distribución temporal del SO_2 en 2021. **a)** El promedio diario es el área en amarillo oscuro, los puntos y el área sombreada clara son la concentración horaria máxima por día. **b)** Perfil horario, la línea amarilla es el promedio de todas las estaciones y las líneas grises son el perfil horario por sitio. **c)** Serie de tiempo con promedios mensuales de 1995-2021. La línea amarilla es la concentración promedio de todas las estaciones, la región sombreada en amarillo es la desviación estándar y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

[1] La regresión LOESS es una técnica no paramétrica que utiliza regresión ponderada local para ajustar una curva suave a través de puntos en un diagrama de dispersión. Las curvas de LOESS pueden evidenciar tendencias y ciclos en datos que son difíciles de modelar con una curva paramétrica. El polinomio se ajusta con los mínimos cuadrados ponderados y brinda más peso a los puntos cercanos al punto cuya respuesta que se está estimando y menos peso a los más lejanos.

ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NOx)



Descripción

- **Nombre**: Óxidos de nitrógeno
- **Fórmula molecular**: NO, NO_2, N_2O y N_2O_5
- **Sinónimos NO**: óxido nítrico, óxido de nitrógeno, monóxido de nitrógeno
- **Sinónimos NO_2**: dióxido de nitrógeno

Propiedades físicas

NO: gas fuerte, de olor dulce e incoloro
- **Punto de fusión**: -163.6°C
- **Punto de ebullición**: -151.8°C
- **Densidad relativa**: 1.04 (aire=1)

NO_2: gas de color marrón rojizo con olor irritante.
- **Punto de fusión**: -9.3°C
- **Punto de ebullición**: 21.15°C
- **Densidad de vapor**: 1.58

Propiedades químicas

El **NO** solo se quema cuando se calienta con hidrógeno y cuando se disuelve en agua, forma ácido nítrico (HNO_3). El **NO_2** es poco soluble en agua para formar ácido nitroso (HNO_2).

Efectos en la salud

Causa irritación en los ojos, nariz, garganta y pulmones, lo que puede ocasionar tos, dificultad para respirar, cansancio y náuseas.

En la CDMX y su área metropolitana, los NOx son generados principalmente en procesos de combustión, de los cuales, el transporte tiene mayor contribución de emisiones (84%), mientras que las fuentes de área aportan el 10% y las fuentes puntuales contribuyen con el 6%, especialmente por la generación de energía eléctrica (SEDEMA, 2023).

El dióxido de nitrógeno (NO_2), además de causar efectos en la salud, tiene una participación importante en la formación del ozono (O_3) troposférico. Las emisiones de procesos de combustión contienen óxido nítrico (NO) y una fracción menor de NO_2. Los vehículos aportan la mayor cantidad de óxidos de nitrógeno (NO + NO_2). Las fuentes más importantes de NO_2 en la CDMX son la oxidación del NO y la fotólisis del ácido nítrico, la cual contribuye a la formación de NO_2 secundario.

Durante 2021, los promedios anuales de las estaciones con el 70 % de suficiencia para NOx, NO_2 y NO en la ZMCM fueron 34, 21 y 13 ppb, respectivamente. Estos valores fueron mayores a los registrados en 2020, debido a que el año pasado fue afectado por las restricciones de la pandemia COVID-19. Las estaciones en la CDMX obtuvieron promedios más altos en las tres especies (NOx, NO_2 y NO), en comparación con el EDOMEX. Esto es debido a que los máximos se registraron en el centro de la CDMX, en sitios cerca de vialidades importantes como MER, CAM, UIZ y MGH, mientras que, en el EDOMEX, las estaciones con los valores más altos fueron TLA, FAC, CUT y CHO. En el NO_2, que es predominantemente de origen secundario, los máximos corresponden a la contribución de las emisiones locales y las transportadas desde el norte de la ZMCM (Figura 4.4).

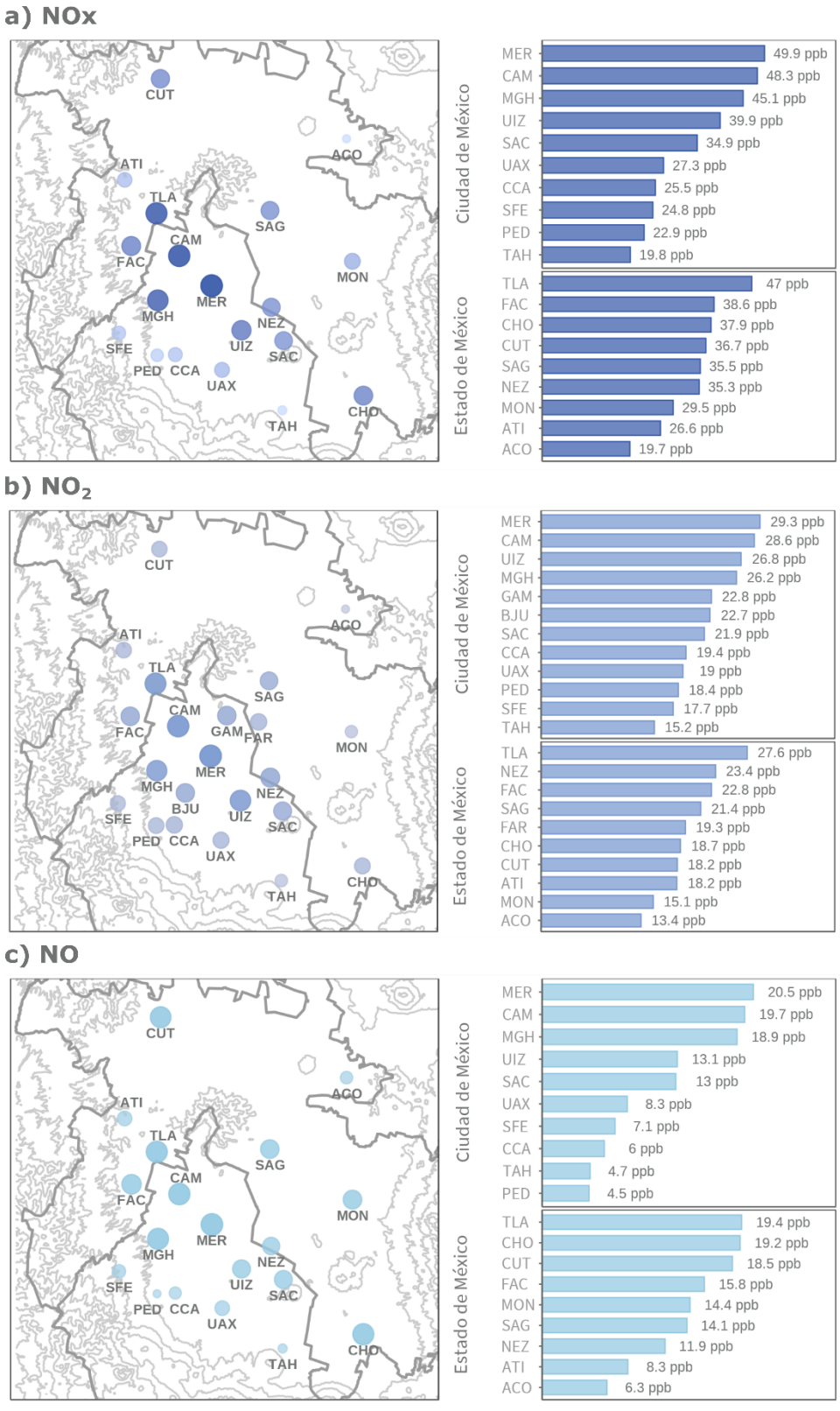


Figura 4.4. Promedio anual por sitio de monitoreo para: **a)** NOx, **b)** NO_2 y **c)** NO. El mapa (izquierda) presenta la ubicación de la estación, el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del promedio anual y las gráficas de barras (derecha) corresponden al promedio anual dividido por entidad.

La serie de tiempo de NOx, NO y NO_2 (**Figura 4.5a, 4.6a y 4.7a**), muestra el comportamiento anual de estos contaminantes, se observó que diciembre registró la concentración más alta, similar a los registros históricos, con 58 ppb para NOx, 27 ppb para NO y 31 ppb para NO_2. En la comparación del 2021 con el histórico (2003-2020) se encuentran algunas diferencias, ya que la época seca fría (noviembre a febrero) normalmente presenta valores más altos, seguida por la temporada seca caliente (marzo a junio), mientras que la época de lluvias (julio a octubre) tiene los niveles más bajos. Sin embargo, durante 2021, mayo tuvo la concentración mínima para NOx y NO con un promedio de 24 ppb y 7 ppb, respectivamente, esto debido a la presencia de lluvias intensas a la mitad del mes, en consecuencia, la atmósfera se limpió. En el caso del NO_2, la concentración mínima mensual se registró en agosto con 17 ppb, similar al comportamiento histórico (2003 a 2020), esto ocurre porque el NO_2 tiene contribuciones de origen primario y secundario, incluso su máximo horario se presenta dos horas después de los máximos de NO y su comportamiento durante mayo fue parecido a los contaminantes secundarios. Los máximos para el promedio horario de NOx, NO_2 y NO fueron 498 ppb (Camarones, 4 de febrero), 132 ppb (Merced, 9 de diciembre) y 431 ppb (Camarones, 4 de febrero), respectivamente.

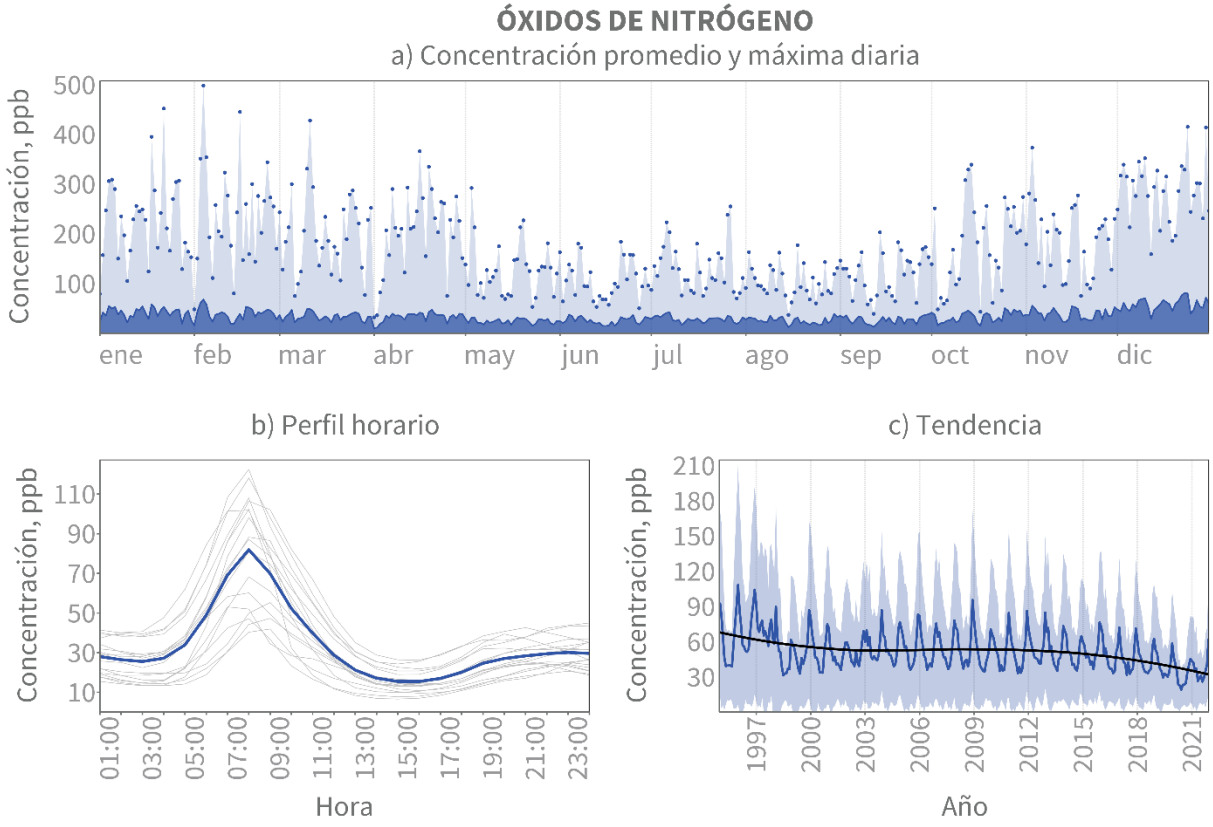


Figura 4.5. Distribución temporal de NOx en 2021. **a)** El promedio diario es el área en azul oscuro, los puntos y el área sombreada clara son la concentración horaria máxima por día. **b)** Perfil horario, la línea azul es el promedio con todas las estaciones y las líneas grises son el perfil horario por sitio. **c)** Serie de tiempo con promedios mensuales de 1995-2021. La línea azul fuerte es la concentración promedio de todas las estaciones, la región sombreada en azul es la desviación estándar y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

Durante las mañanas cuando se incrementa la emisión de los NOx, el óxido nítrico (NO) es la especie más abundante. La concentración más alta del NOx generalmente se observa entre las 06:00 y las 10:00 h, con un pico máximo alrededor de las 08:00 h, cuando se presenta la mayor intensidad del tránsito vehicular y la altura de la capa de mezcla es mínima (**Figura 4.5b**). Las concentraciones típicas del dióxido de nitrógeno (NO_2) reportadas en la CDMX, no superan el valor límite de la NOM; sin embargo, su importancia radica en la participación como precursor del smog fotoquímico, el NO_2 contribuye a la formación de ozono vía fotólisis. El origen secundario del NO_2, hace que su patrón horario sea diferente al del NO, con un comportamiento bimodal, el primer máximo se presenta a las 10:00 h con un promedio de 30 ppb, después de los máximos del NO, pero antes de las concentraciones máximas del O_3, mientras que en la noche se observa un segundo máximo entre las 22:00 y 23:00 h con una concentración promedio de 24 ppb (**Figura 4.6b**). El óxido nítrico (NO) se oxida rápidamente a NO_2 después de su emisión, por lo que su concentración máxima se registra a las 08:00 h con un valor promedio de 56 ppb y un mínimo de 2 ppb a las 16:00 h, debido al incremento de la capa límite y de la capacidad dispersiva de la atmósfera (**Figura 4.7b**).

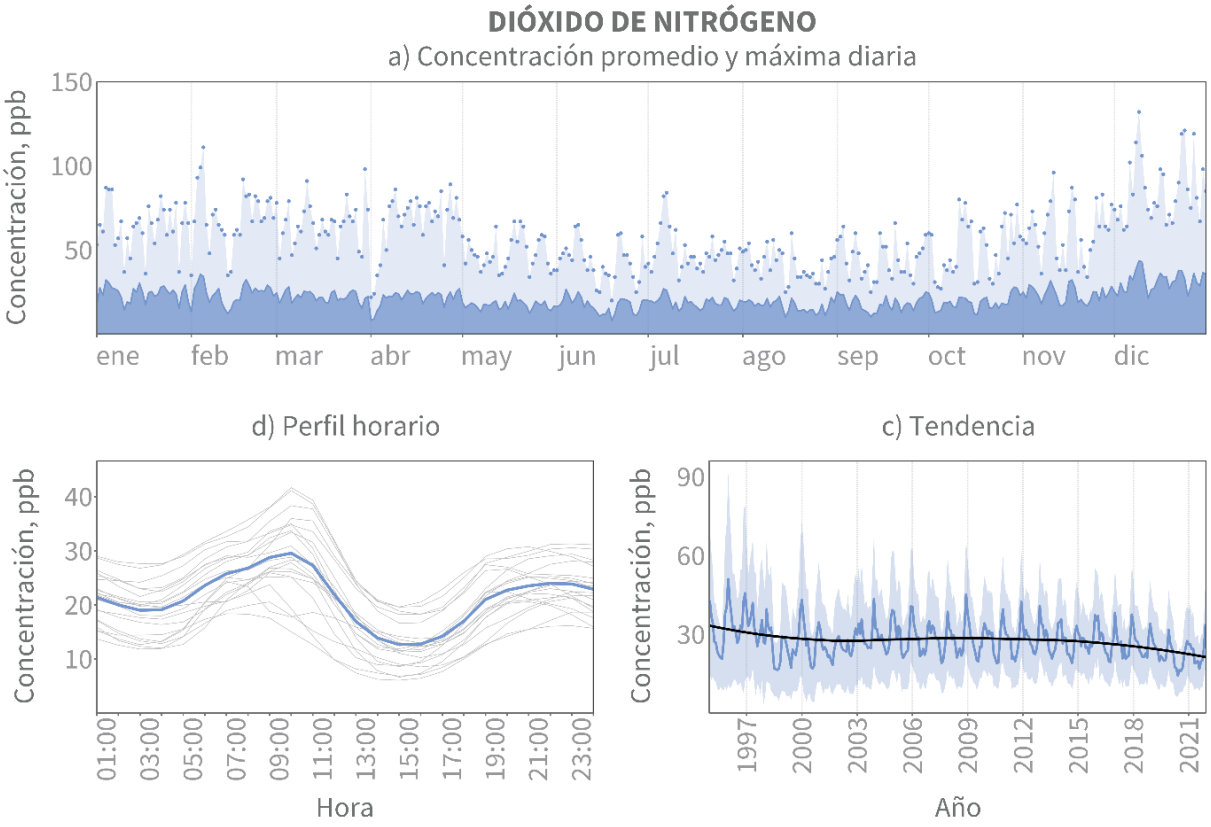


Figura 4.6. Distribución temporal de NO_2 en 2021. **a)** El promedio diario es el área en azul oscuro, los puntos y el área sombreada clara son la concentración horaria máxima por día. **b)** Perfil horario, la línea azul es el promedio con todas las estaciones y las líneas grises son el perfil horario por sitio. **c)** Serie de tiempo con promedios mensuales de 1995-2021. La línea azul fuerte es la concentración promedio de todas las estaciones, la región sombreada en azul es la desviación estándar y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

En el análisis de la tendencia de los tres contaminantes, se observa que en las dos primeras décadas se mantuvo casi constante con ligeros decrementos; sin embargo, a partir de 2015, la reducción de concentración es más notable, lo cual se observa en la línea de tendencia de LOESS. El decremento más relevante fue derivado de la reducción de emisiones durante 2020 y que se extendió al 2021, donde las actividades normales todavía no se reiniciaban al 100% debido a la pandemia COVID-19. En la comparación de la tendencia LOESS de 1995 con el año 2021, se tuvieron reducciones del 49 % en NOx, del 56 % en NO (comparado con 2003) y del 32 % para el NO_2, este último es más difícil reducirlo ya que tiene origen primario y secundario, además reacciona con otros compuestos para formar contaminantes fotoquímicos como el O_3 (**Figura 4.5c, 4.6c y 4.7c**). Es importante mencionar que, aún con el incremento del número de vehículos en circulación, la tendencia muestra reducciones en los tres compuestos de nitrógeno, como resultado de la gestión de diversos programas ambientales implementados en la ZMCM.

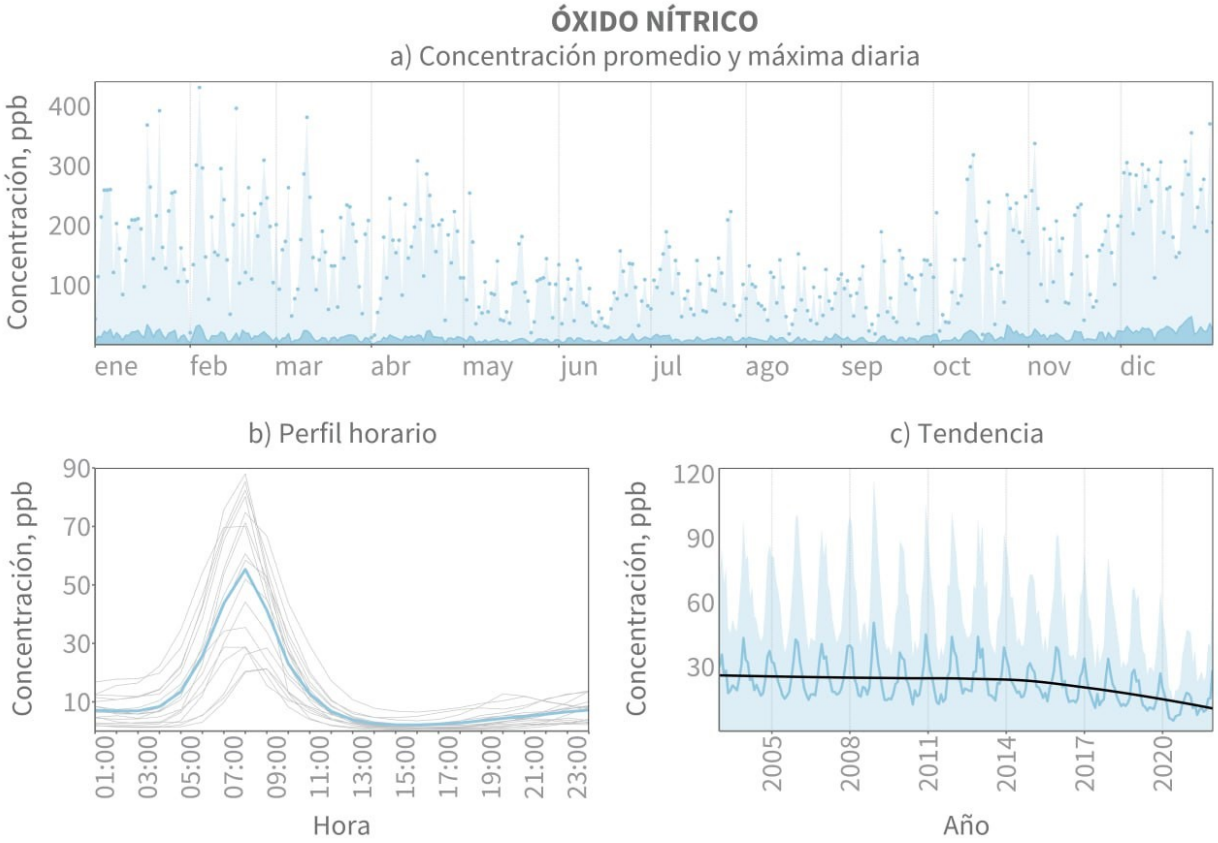


Figura 4.7. Distribución temporal de NO en 2021. **a)** El promedio diario es el área en azul oscuro, los puntos y el área sombreada clara son la concentración horaria máxima por día. **b)** Perfil horario, la línea azul es el promedio con todas las estaciones y las líneas grises son el perfil horario por sitio. **c)** Serie de tiempo con promedios mensuales de 2003-2021. La línea azul fuerte es la concentración promedio de todas las estaciones, la región sombreada en azul es la desviación estándar y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

Descripción

- **Nombre**: Monóxido de carbono
- **Fórmula molecular**: CO
- **Sinónimos**: óxido carbónico, óxido de carbono

Propiedades físicas

- Gas altamente venenoso
- Incoloro, inodoro e insípido.
- **Punto de fusión**: -205 °C
- **Punto de ebullición**: -191 °C

Propiedades químicas

Gas muy inflamable. Se genera a partir de la combustión incompleta.

Puede formar compuestos tóxicos e inflamables cuando se expone a polvos metálicos. Reacciona con oxígeno, acetileno, cloro, flúor y óxido nitroso.

Efectos en la salud

En bajas concentraciones ocasiona fatiga en personas sanas y dolor de pecho en personas con enfermedades cardíacas. En concentraciones más altas, causa problemas de visión y coordinación, dolores de cabeza, mareo, confusión y náuseas. Puede ser mortal en concentraciones muy altas.

En la CDMX y su área metropolitana el monóxido de carbono (CO), las fuentes móviles contribuyen con el 96 % asociado a los procesos de combustión, el 3.7 % proviene de las fuentes de área, especialmente de la quema a cielo abierto y el restante 0.3% corresponde a las fuentes puntuales, en procesos de generación de energía eléctrica (SEDEMA, 2023).

El promedio anual de CO fue de 0.39 ppm, calculado para todas las estaciones con suficiencia del 70 %; y en comparación con 2020, el valor del 2021 tuvo un incremento del 2.6 %. Ambas entidades (CDMX y EDOMEX) registraron el mismo promedio anual de 0.39 ppm. La estación La Presa (LPR), ubicada en el municipio de Tlalnepantla de Baz en el noreste de la ZMCM, reportó un promedio anual máximo de 0.60 ppm.

En general, los promedios anuales más altos fueron en los sitios cercanos a vialidades con elevado tránsito vehicular en la región centro y oriente de la ZMCM, mientras que los valores mínimos de CO se registraron en las estaciones ACO, INN SFE, CUA, PED y CCA, ubicadas en el sur de la ZMCM, así como en zonas residenciales, semirrurales y en las afueras de la zona urbana (Figura 4.8).

La concentración máxima horaria fue de 4.5 ppm en la estación Nezahualcóyotl (NEZ), en el oriente de la ZMCM, mientras que el máximo del promedio móvil de 8 horas fue de 2.6 ppm en los sitios LPR y Santiago Acahualtepec (SAC) durante el 24 y 25 de diciembre, respectivamente.

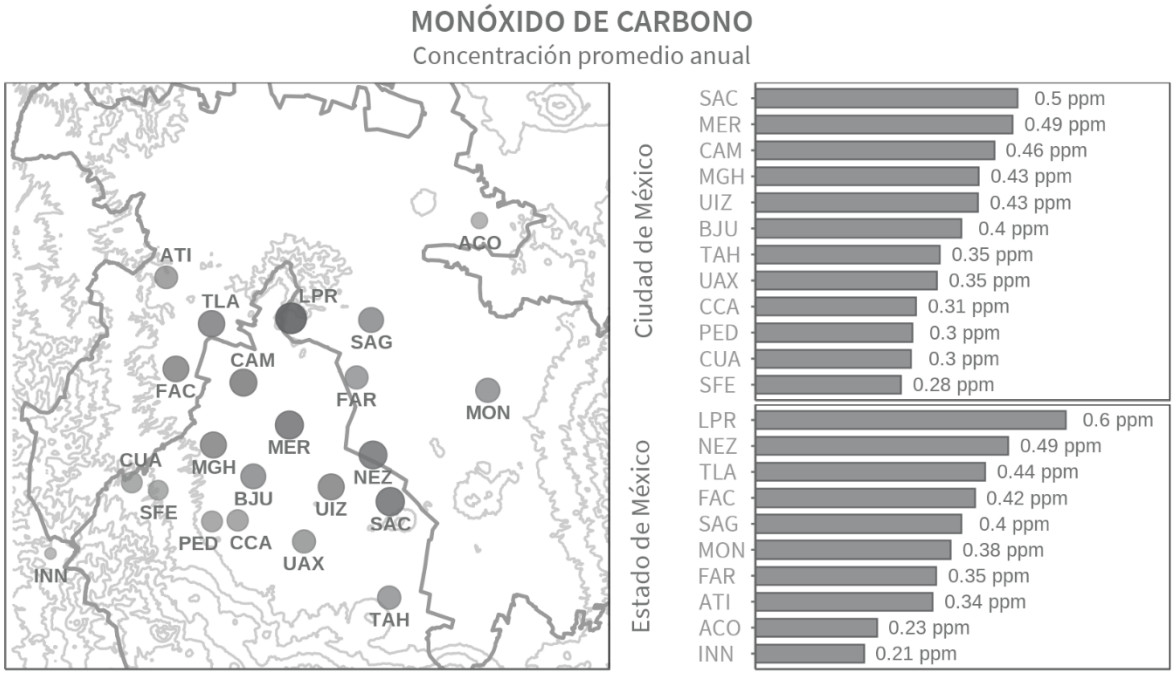


Figura 4.8. Promedio anual de CO por sitio de monitoreo. **a)** En el mapa (izquierda) se presenta la ubicación de la estación, el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del promedio anual y **b)** las gráficas de barras (derecha) corresponden al valor del promedio anual dividido por entidad.

En 2021, los valores más altos de CO se registraron en los meses fríos, que se relaciona con el incremento de inversiones térmicas, estabilidad atmosférica y temperatura baja, lo que ocasiona que la capa límite tarde más en incrementarse. El máximo del promedio mensual fue en diciembre con 0.62 ppm, ocasionado por el incremento de la movilidad por las fiestas decembrinas, seguido de los meses de enero y febrero con 0.48 ppm y 0.43 ppm, respectivamente. El promedio mensual mínimo de CO fue en mayo con 0.28 ppm, al igual que lo observado para NOx y NO, esto fue ocasionado por las lluvias intensas que se presentaron a mediados de mayo, similar a los meses de lluvia en otros años, que normalmente registran las concentraciones más bajas (**Figura 4.9a**).

El perfil horario del CO en 2021 (**Figura 4.9b**), tuvo un comportamiento típico de este contaminante con una curva bimodal, muy pronunciada en las primeras horas de la mañana, que se relaciona directamente con el incremento del tránsito vehicular. El máximo ocurrió entre las 08:00 y las 09:00 h, mientras que, de las 20:00 a las 23:00 h se presentó un pico de menor magnitud, el cual se relaciona con el otro momento de mayor tránsito vehicular. Las estaciones del sur presentaron el máximo una hora después de la zona norte y centro, mientras que, para las estaciones cercanas a vialidades, registraron un pico de dos horas como SAC, TLA y TAH. En el sitio INN, ubicado fuera de la zona urbana y en un área boscosa, presentó un perfil diferente, donde no se observa un máximo definido sino un ligero incremento a partir de las 09:00 h que decrece a las 21:00 h.

La tendencia del CO desde 1995, muestra que a partir del 2009 se presentó el último decremento notable y en los siguientes años, la tendencia presenta ligeras reducciones, que están relacionadas con la disminución de emisiones y aplicación de programas ambientales. En la comparación de los valores observados en 1995 con los de 2021, se determinó una reducción del 86 % en el ajuste de tendencia de LOESS (Figura 4.9c).

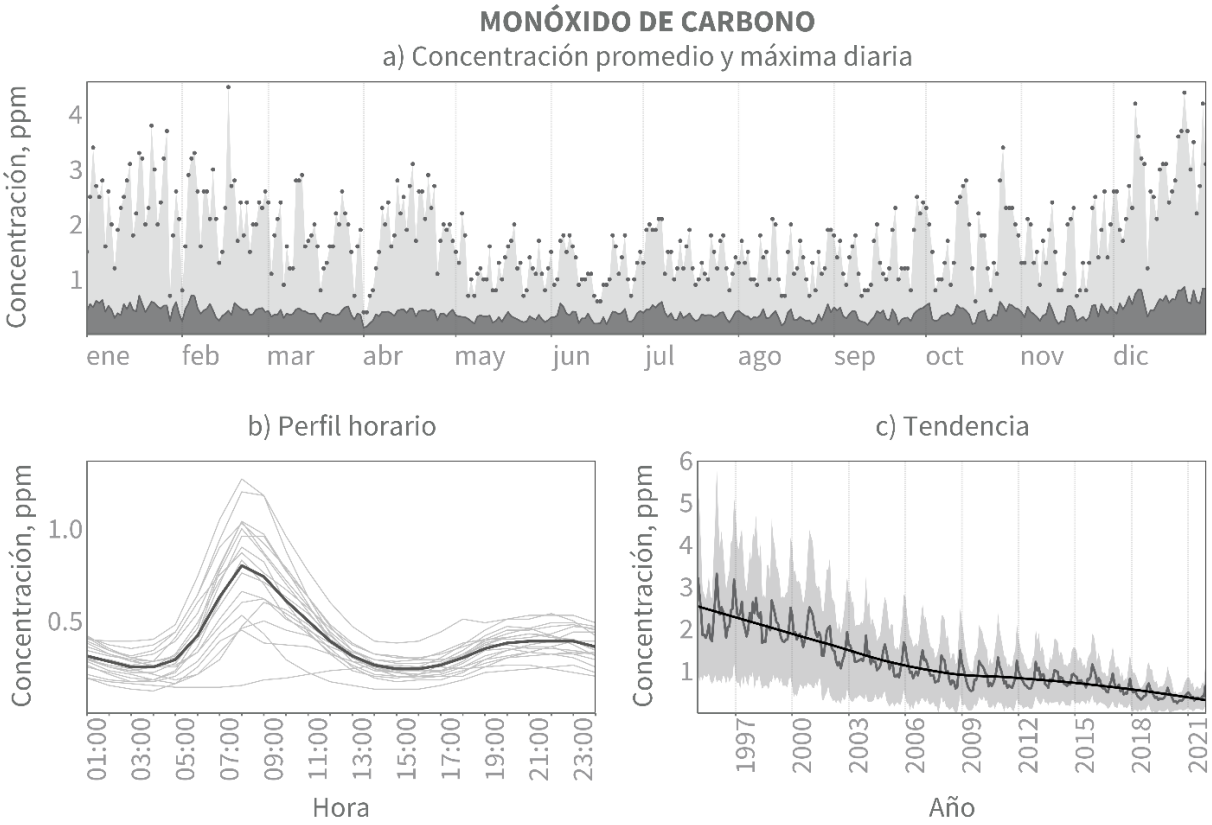
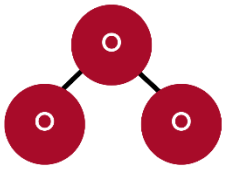


Figura 4.9. Distribución temporal de CO en 2021. **a)** El promedio diario es el área en gris oscuro, los puntos y el área sombreada clara son la concentración horaria máxima por día. **b)** Perfil horario, la línea gris es el promedio con todas las estaciones y las líneas grises son el perfil horario por sitio. **c)** Serie de tiempo con promedios mensuales de 1995-2021. La línea gris oscuro es la concentración promedio de todas las estaciones, la región sombreada en gris es la desviación estándar y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

OZONO (O_3)



Descripción

- **Nombre**: Ozono
- **Fórmula molecular**: O_3
- **Sinónimos**: tri-oxígeno, catena-tri-oxígeno

Propiedades físicas

- Es el primer alótropo de un elemento químico
- Fuerte oxidante, es de color azul en altas concentraciones, olor picante.
- Uso desinfectante.
- **Punto de fusión:** -192 °C
- **Punto de ebullición:** -112 °C
- **Solubilidad en agua:** 0.105 g/100 mL (0 °C)

Propiedades químicas

Se forma en reacciones fotoquímicas entre óxidos de nitrógeno (NOx) y compuestos orgánicos volátiles (COV) derivados de fuentes como la quema de combustible. Es un potente oxidante, muy soluble y es extremadamente reactivo.

Efectos en la salud

Debido a que es fuerte oxidante, tiene efectos en la salud de los humanos. Irrita la garganta, ojos, afecta el sistema respiratorio y cardiovascular. El O_3 también causa daño a la vegetación.

El ozono es el primer alótropo[2] de un elemento químico, que fue identificado por la ciencia, el oxígeno puede existir como oxígeno atmosférico (O_2) y como ozono (O_3). Tiene un olor característico (ocre), que se puede identificar después de tormentas eléctricas o caída de un rayo.

El ozono troposférico (O_3) es un contaminante secundario que se forma a partir de la radiación solar y sus precursores, que son los óxidos de nitrógeno (NOx) y los compuestos orgánicos volátiles (COV). De acuerdo con el último Inventario de emisiones de la ZMCM (SEDEMA, 2023), se reporta que se emitieron 134,147 toneladas de NOx, de las cuales el 84 % corresponden a fuentes móviles y en el caso de los COV, se emiten más de 434,000 toneladas, la mayoría (64 %) provienen de fuentes de área, como las viviendas, desechos urbanos, uso comercial y doméstico de solventes, así como las fugas de gas LP; mientras que las fuentes móviles contribuyen con el 26 % del total de los COV, y finalmente, las emisiones provenientes de la vegetación representan el 7.4 %.

El número de horas con valores superiores a 95 ppb, que es el límite horario de la NOM, fue de 696 horas distribuidas en 191 días (sin considerar estaciones de transporte: ACO, INN, MPA, AJU y MON). En el promedio móvil de 8 h (Límite de la NOM: 70 ppb), se contabilizaron 200 días con valores superiores a la NOM, con un máximo de 131 ppb el día 28 de junio en el sitio Ajusco Medio (AJM).

[2] Alotropía es la propiedad de algunas sustancias simples de poseer estructuras atómicas o moleculares diferentes. Las moléculas formadas por un solo elemento y que poseen distinta estructura molecular se llaman alótropos

La distribución espacial del número de horas > 95 ppb por estación (**Figura 4.10**) presenta mayor cantidad de horas en los sitios del sureste de la ZMCM, con el máximo de 371 horas en Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA), esto es debido al flujo predominante del viento desde el norte de la ciudad, que ocasiona el arrastre de precursores y de ozono hacia el sur, además, en el suroeste se presenta acumulación del contaminante debido a la barrera montañosa, por lo tanto, en esta región se presentan las concentraciones más altas de O_3 y otros contaminantes secundarios.

En el EDOMEX, solamente tres estaciones (NEZ, FAC y FAR) de las 12 con suficiencia anual del 70 %, registraron más de 100 horas con valores mayores a 95 ppb, lo cual representa el 25 % de las estaciones. En cambio, en la CDMX, en 10 de los 12 sitos con suficiencia, se registraron más de 150 horas con valores superiores al límite (95 ppb), lo que corresponde al 83 % del total. Esto confirma el impacto del transporte de los contaminantes provenientes desde el norte hacia el sur (**Figura 4.10b**).

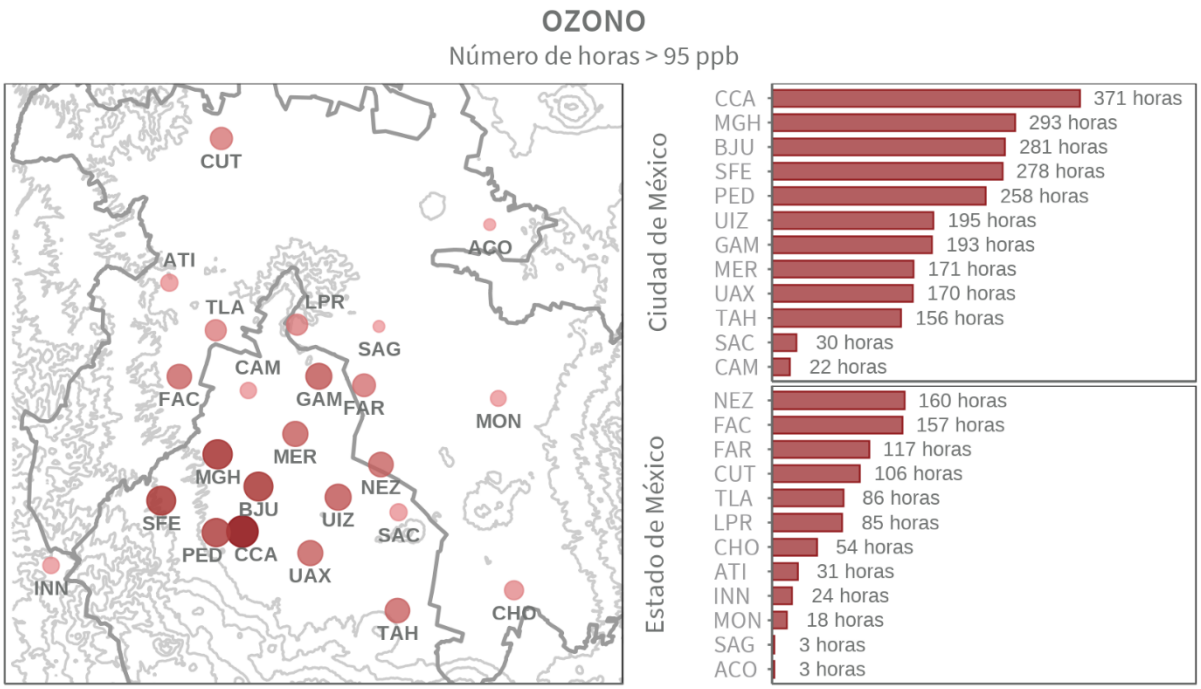


Figura 4.10. Promedio anual de O_3 por sitio de monitoreo. **a)** En el mapa (izquierda) se presenta la ubicación de la estación, el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del promedio anual y **b)** las gráficas de barras (derecha) corresponden al valor del promedio anual dividido por entidad.

En la ZMCM, los valores más altos de O_3 se presentan durante la primavera, en la temporada de ozono, cuando los días son más largos y la intensidad de radiación solar aumenta. En esta temporada existen factores meteorológicos como la falta de nubosidad y baja intensidad de viento, los cuales favorecen la estabilidad de la atmósfera baja, también son más frecuentes las inversiones térmicas de subsidencia. En el verano, con el inicio de la temporada de lluvia, disminuye la cantidad de precursores y aumenta la inestabilidad atmosférica, lo que conlleva a una disminución en la formación del ozono. En la serie de tiempo de la concentración promedio y la máxima diaria (**Figura 4.11a**) se observa que a mediados de febrero hay un incremento en la concentración, con los máximos a partir de marzo, abril y mayo. El 2021 se caracterizó porque el mes de abril presentó el promedio más alto con 40.0 ppb, esto solamente se ha observado en años como 2014, 2015 y 2018, ya que históricamente mayo registra la concentración más alta. Este cambio ocurrió porque se presentaron lluvias intensas a mediados de mayo, similar a lo que sucedió en los años mencionados, en consecuencia, la atmósfera se limpia y la concentración promedio de mayo (38.6 ppb) fue menor a la de abril (40.0 ppb). Los promedios mensuales mínimos se presentaron en agosto y octubre con 24.1 y 23.8 ppb, respectivamente.

La naturaleza fotoquímica del O_3 hace que tenga un comportamiento diurno característico con los máximos en las horas de mayor intensidad solar (12:00 a 17:00 h). Durante la noche, la actividad fotoquímica se detiene y la concentración disminuye; sin embargo, en algunos sitios el O_3 puede alcanzar valores de hasta 80 ppb; este ozono puede provenir de la contaminación remanente del día, ser de origen estratosférico o una mezcla de ambos. La concentración mínima se registró entre las 06:00 y las 08:00 h, lo cual se relaciona con la reacción del O_3 con los NOx recién emitidos en la actividad matutina (**Figura 4.11b**).

La tendencia del O_3 desde 1995, muestra una reducción hasta el 2007 y desde ese año, el decremento es prácticamente nulo y a partir del 2014, se observa un ligero incremento en la tendencia, el cual todavía se observó en 2021. En la comparación con 1995, hay una reducción del 30 % en las concentraciones; sin embargo, si consideramos el periodo del 2010 al 2021 la tendencia presenta un incremento del 8 % con el ajuste del LOESS[1] (**Figura 4.11c**).

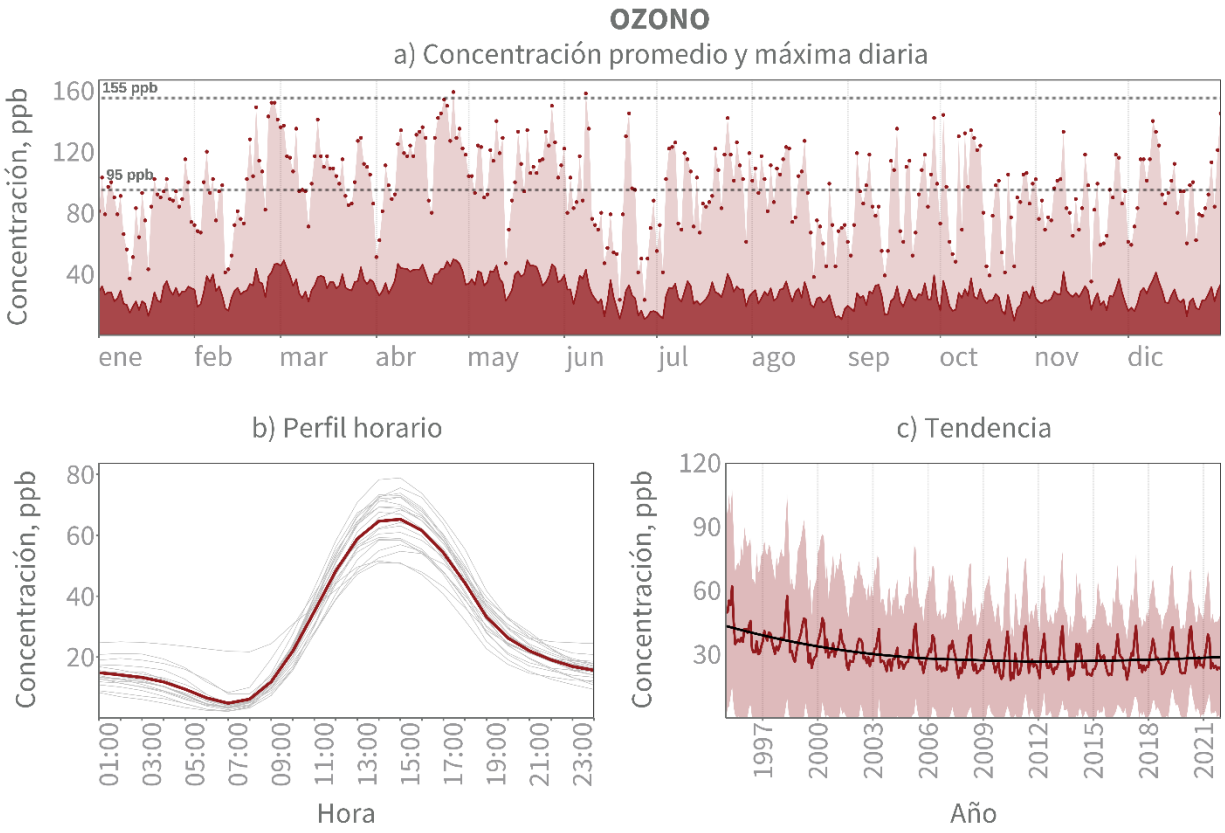
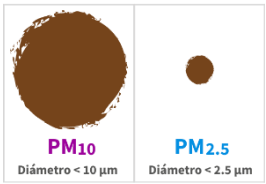


Figura 4.11. Distribución temporal de O_3 en 2021. **a)** El promedio diario es el área en rojo oscuro, los puntos y el área sombreada clara son la concentración horaria máxima por día, las líneas punteadas horizontales representan el límite horario de la NOM (95 ppb) y el umbral de Fase 1 de contingencia (155 ppb). **b)** Perfil horario, la línea roja es el promedio con todas las estaciones y las líneas grises son el perfil horario por sitio. **c)** Serie de tiempo con promedios mensuales de 1995-2021. La línea en rojo oscuro es la concentración promedio de todas las estaciones, la región sombreada en rojo es la desviación estándar y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

PARTÍCULAS SUSPENDIDAS



Descripción

- **Nombre**: Partículas (**PM_{10}** <10 µm y **$PM_{2.5}$** -< 2.5 µm)
- **Sinónimos**: polvo, partículas inhalables, partículas respirables, smog, niebla

Propiedades físicas

Partículas de cualquier sustancia que tengan menos de 10 o 2,5 micrómetros (µm) de diámetro. Estas partículas constituyen una gran proporción del polvo que puede penetrar profundamente en los pulmones. Las partículas más grandes son retenidas en la nariz, la boca o la garganta, mientras que las más pequeñas pueden alcanzar otros órganos y torrente sanguíneo.

Propiedades químicas

Varían según las fuentes de emisión, tienen diversos compuestos y se clasifican por tamaño.

Efectos en la salud

Efectos tóxicos por absorción del material en sangre, efectos alérgicos o hipersensibilidad, infecciones bacterianas y fúngicas, fibrosis, cáncer, irritación de las mucosas, aumento de síntomas respiratorios, agravamiento del asma y muerte prematura, enfermedades cardiacas.

Todas las personas están expuestas continuamente a las partículas, excepto en entornos con filtros especiales. La exposición y el daño a la salud puede ser mayor en áreas urbanas e industriales debido al número de fuentes; sin embargo, también se presentan niveles altos de partículas en ambientes naturales. Existen factores que influyen en los efectos de las partículas sobre la salud como son: composición química y propiedades físicas; la concentración másica en el aire; el tamaño y duración de la exposición. De acuerdo con las investigaciones epidemiológicas recientes, no existe un umbral seguro de concentración de partículas en el que no se produzca efectos en la salud (OMS, 2021).

En la ZMCM, se emitieron 30,135 toneladas de PM_{10} de las cuales, las fuentes de área tienen mayor contribución con el 42 % (re suspensión de polvo sobre vialidades pavimentadas: 15 %, quema de basura: 8.7 % y labranza-cosecha con el 7.7 %); el transporte emite el 41 % con principal aporte de autos particulares y los vehículos de carga pesada debido al diésel que utilizan. Finalmente, la industria tiene una contribución del 3 %, especialmente en la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica. En cuanto a las $PM_{2.5}$ se emitieron 14,939 toneladas y la mayor contribución es el transporte (42 %), generado por los vehículos pesados de carga y de transporte público que utilizan diésel, seguido de los autos particulares y las motocicletas. Las fuentes de área aportan el 40 %, principalmente a la quema de cielo abierto de residuos sólidos y al tránsito sobre vialidades pavimentadas. En el sector industrial la mayor emisión es similar a las PM_{10}, ocasionada por la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica (SEDEMA, 2023).

El Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT), mide las partículas con equipos automáticos en RAMA en tres fracciones: PM_{10}, $PM_{2.5}$ conocidas como partículas finas y la fracción gruesa; que es la diferencia entre PM_{10} y $PM_{2.5}$ ($PM_{10\text{-}2.5}$). Además, la REDMA mide partículas en equipos manuales o semiautomáticos denominados "método de referencia", los cuales se muestrean cada seis días, y se obtienen datos de Partículas Suspendidas Totales (PST), PM_{10} y $PM_{2.5}$. La información de la REDMA se utiliza para comparar con los equipos continuos, para evaluar la Norma Oficial Mexicana de salud (NOM) y determinar su composición.

Los promedios anuales en la ZMCM calculados del monitoreo continuo (RAMA) durante 2021 en las estaciones con suficiencia anual del 70 % fueron: de 39 $\mu g/m^3$ en PM_{10}, 20 $\mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$ y 18 $\mu g/m^3$ en $PM_{10\text{-}2.5}$. Por otro lado, en la CDMX, el promedio anual fue 36 $\mu g/m^3$ en PM_{10}; 20 $\mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$ y 16 $\mu g/m^3$ en $PM_{10\text{-}2.5}$, las estaciones con el promedio anual máximo fueron Cuautitlán (CUT) con 48.3 $\mu g/m^3$ para PM_{10}; SAC, CAM y MER con 22.6 $\mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$ y por último SAG con 27.6 $\mu g/m^3$ para $PM_{10\text{-}25}$ (**Figura 4.12**). Los máximos del promedio de 24 horas reportados para cada fracción fueron 159 $\mu g/m^3$ en PM_{10} (28 de marzo en Nezahualcóyotl, NEZ); 105 $\mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$ (25 de diciembre en Santiago Acahualtepec, SAC) y finalmente, la fracción $PM_{10\text{-}2.5}$ registró su máximo de 106 $\mu g/m^3$ (28 de marzo en la estación UAM-Iztapalapa, UIZ), esto debido a que durante marzo se registraron varios días con viento intenso en toda la ZMCM.

En la distribución espacial, históricamente se han registrado los valores más altos de las tres fracciones en las estaciones ubicadas al norte y centro de la ZMCM, especialmente en los sitios de los municipios conurbados del Estado de México. En 2021, las estaciones del norte CUT, SAG, TLA y ACO presentaron los promedios máximos, esto debido a la contribución de las partículas generadas por el intenso tránsito vehicular, las actividades agrícolas en los alrededores, así como el polvo proveniente de las zonas erosionadas y que se levanta por acción del viento. La distribución de las $PM_{2.5}$ es diferente porque tienen una gran porción de origen secundario (entre 60 y 80 %), por lo que es más homogénea en toda la ZMCM; sin embargo, las estaciones al suroeste registran casi el 50 % menos de concentración del promedio anual (**Figura 4.12**).

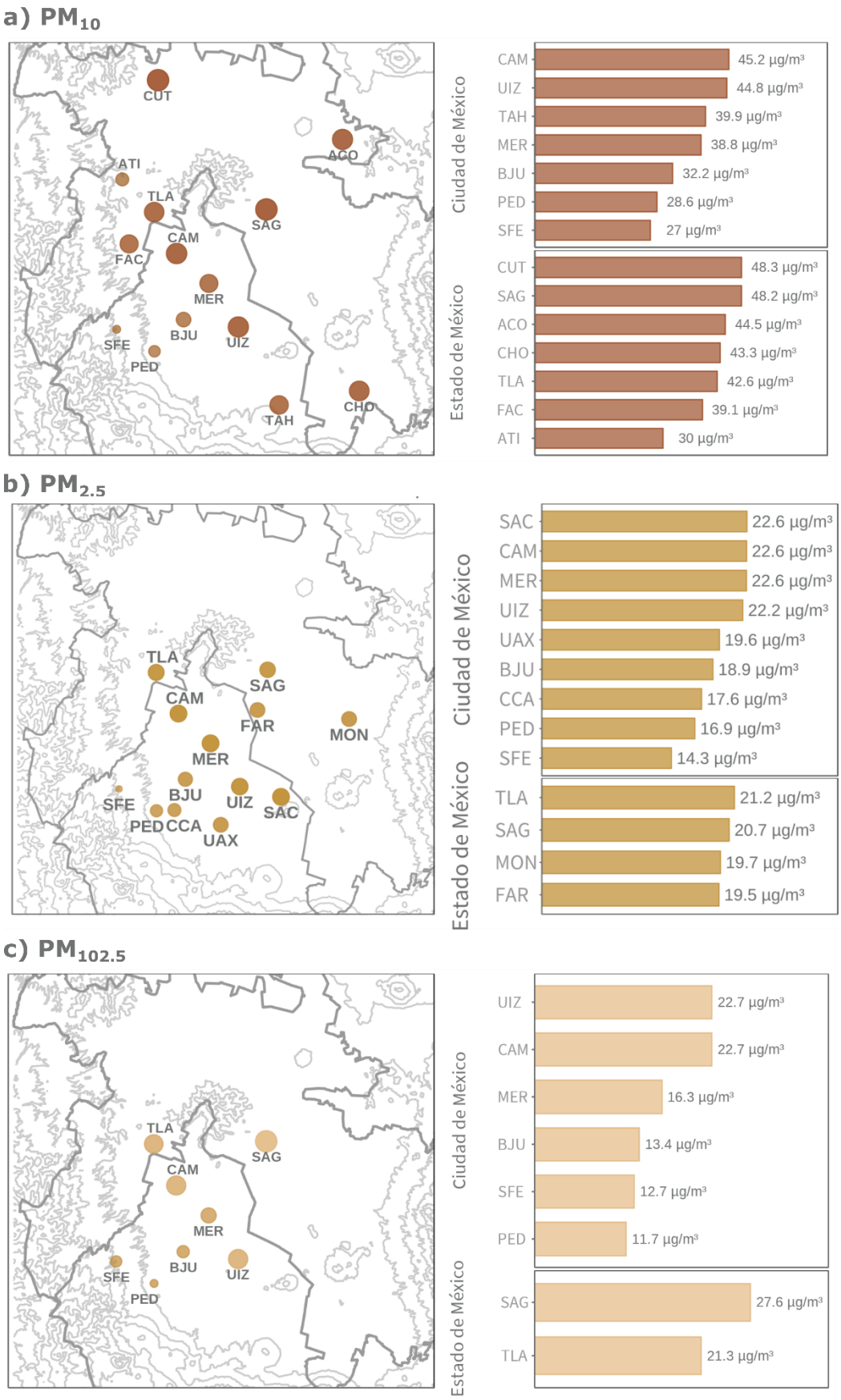


Figura 4.12. Promedio anual por sitio de monitoreo para: **a)** PM_{10}, **b)** $PM_{2.5}$ y **c)** $PM_{10\text{-}2.5}$. En el mapa (izquierda) se presenta la ubicación de la estación, el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del promedio anual y las gráficas de barras (derecha) corresponden al promedio anual dividido por entidad.

Las series de tiempo de los promedios diarios de cada una de las fracciones de partículas suspendidas (**Figura 4.13a, 4.14a y 4.15a**), se observa que las mayores concentraciones se presentan durante la temporada seca, con máximos en marzo (61.2 µg/m^3) y diciembre (56.4 µg/m^3) para PM_{10}, el valor de marzo está influenciado por los eventos de vientos intensos, especialmente el 28 de marzo, en este día, la estación NEZ alcanzó un valor horario de 982 µg/m^3 a las 18:00 h, y durante esa hora crítica, otras siete estaciones distribuidas en toda la ZMCM superaron los 600 µg/m^3, este evento tuvo una duración total de cinco horas. La fracción $PM_{10\text{-}2.5}$ presenta un comportamiento similar a las PM_{10}, con el promedio mensual máximo en marzo (31 µg/m^3), seguido de febrero y diciembre, los valores de marzo y febrero estuvieron influenciados por el viento y en diciembre por quema de pirotecnia y la estabilidad atmosférica del invierno. Finalmente, las $PM_{2.5}$ que tienen origen secundario, presentaron el promedio mensual más alto en abril, debido a las condiciones meteorológicas que favorecen la formación de contaminantes secundarios y la presencia de incendios, como el registrado en el 21 de abril cerca de la estación NEZ ocasionado por la quema de basura. En las tres fracciones se observa que durante la temporada de lluvia (junio a octubre), los niveles de partículas disminuyeron considerablemente, debido al efecto de lavado atmosférico.

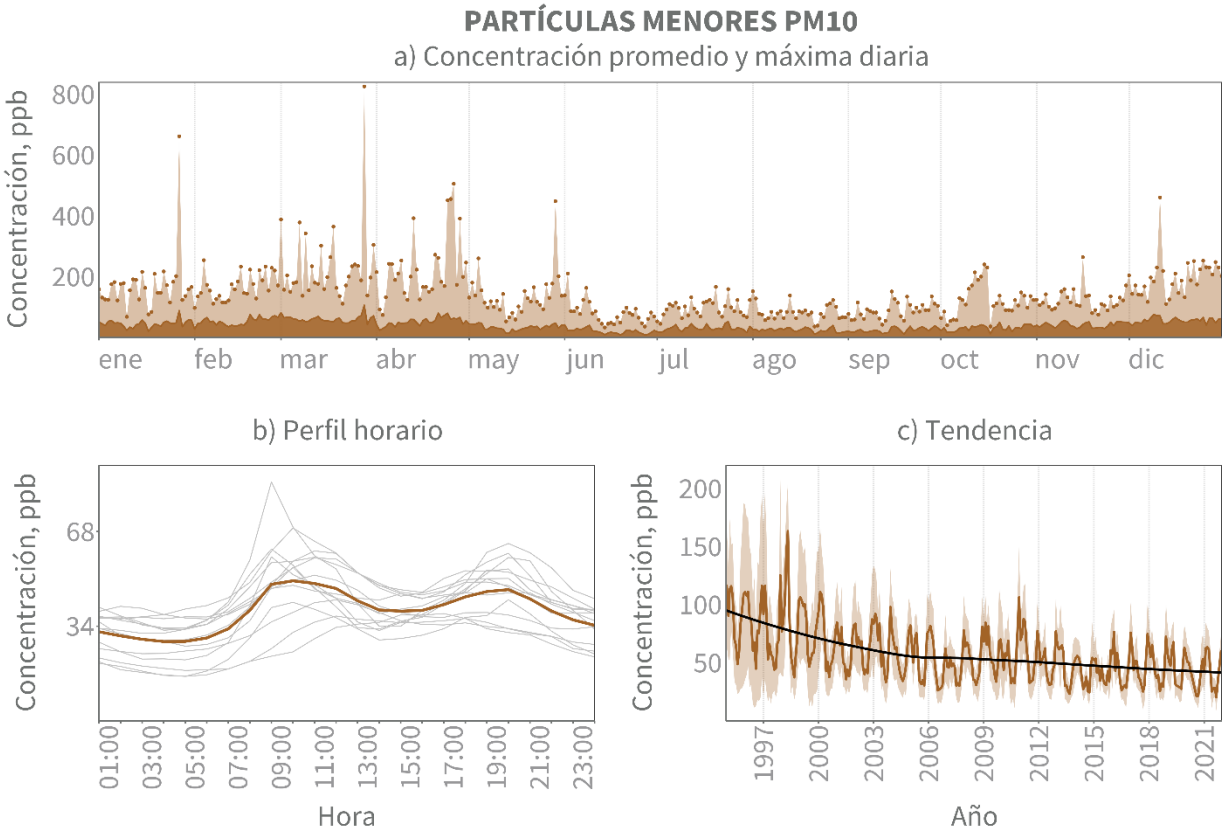


Figura 4.13. Distribución temporal de PM_{10} en 2021. **a)** El promedio diario es el área en café oscuro, los puntos y el área sombreada clara son la concentración horaria máxima por día. **b)** Perfil horario, la línea café es el promedio con todas las estaciones y las líneas grises son el perfil horario por sitio. **c)** Serie de tiempo con promedios mensuales de 1995-2021. La línea café oscuro es la concentración promedio de todas las estaciones, la región sombreada en café es la desviación estándar y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

En los perfiles horarios, las PM_{10} y $PM_{10\text{-}2.5}$ presentaron una distribución bimodal durante el día, con un máximo en la mañana de las 09:00 a las 10:00 h y otro por la tarde, de las19:00 a las 20:00 h (**Figura 4.13b y 4.15b**); mientras que para $PM_{2.5}$ sólo se observó un máximo entre las 11:00 y las 12:00 h (**Figura 4.14b**). Estos comportamientos distintos son debido a las contribuciones de las principales fuentes de partículas en suspensión en la ZMCM. Mientras las partículas $PM_{10\text{-}2.5}$ (fracción gruesa) tienen una contribución importante de polvo re suspendido, las $PM_{2.5}$ (fracción fina) son generadas principalmente durante procesos secundarios (diurnos y nocturnos) en la atmósfera que involucran a los gases y aerosoles emitidos principalmente por las fuentes de combustión. La variabilidad de las PM_{10} (suma de la fracción fina y gruesa) refleja las contribuciones de ambas fracciones durante el día, por lo tanto, los máximos observados en la distribución de la fracción gruesa corresponden a las horas de mayor tránsito vehicular, mientras que los valores más altos de la fracción fina están relacionados con las horas de mayor producción química en la atmósfera.

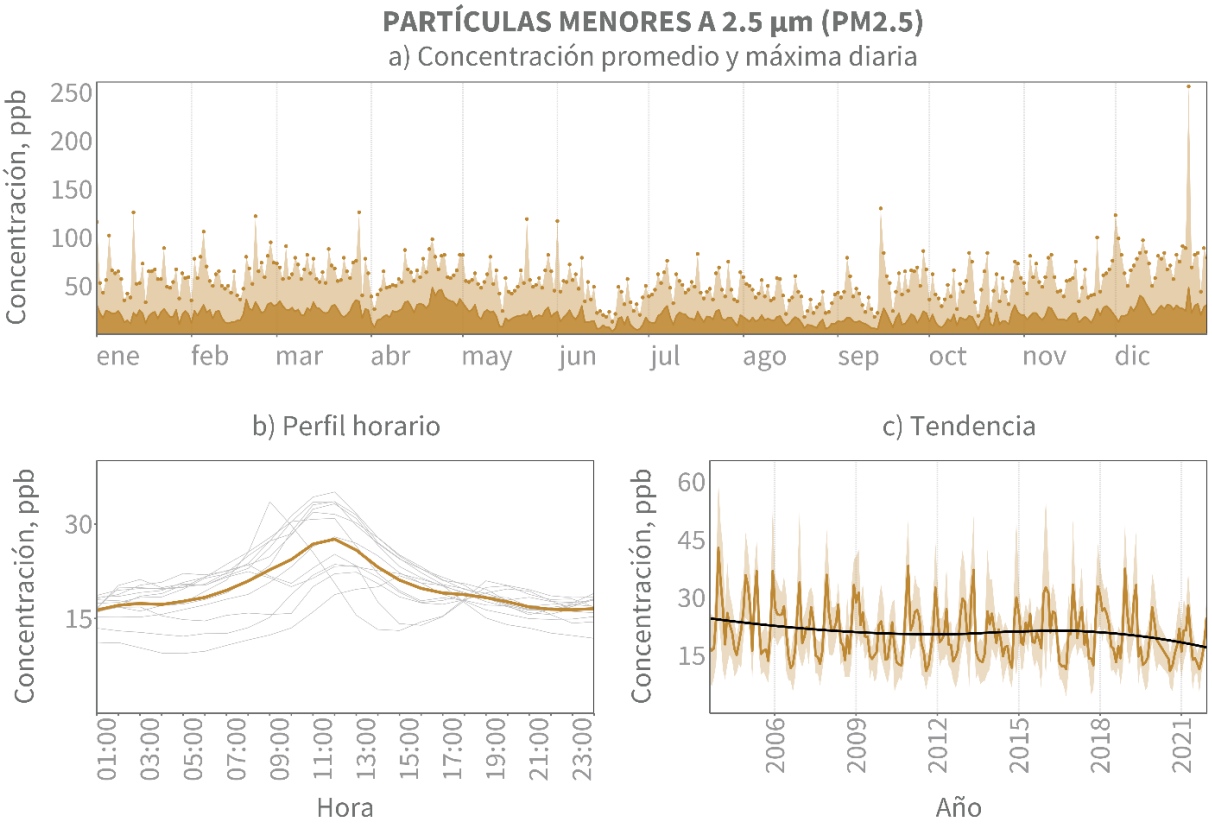


Figura 4.14. Distribución temporal de $PM_{2.5}$ en 2021. **a)** El promedio diario es el área en café oscuro, los puntos y el área sombreada clara son la concentración horaria máxima por día. **b)** Perfil horario, la línea café es el promedio con todas las estaciones y las líneas grises son el perfil horario por sitio. **c)** Serie de tiempo con promedios mensuales de 2004-2021. La línea café oscuro es la concentración promedio de todas las estaciones, la región sombreada en café es la desviación estándar y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

El análisis de la tendencia de las tres fracciones presenta un comportamiento decreciente en todos los años, para PM_{10} la tendencia es decreciente y tiene una mayor reducción en el periodo de 1995 a 2005 y posteriormente, decrece ligeramente cada año, con una reducción total de 1995 a 2021 de 53 %. Las $PM_{2.5}$, presentan una curva más homogénea; sin embargo, de 2013 a 2016 se observa un ligero incremento y posteriormente vuelve a decrecer; la disminución total del 24 % considerando el periodo de 2004 a 2021. Finalmente, para las partículas gruesas ($PM_{10\text{-}2.5}$), se observa un comportamiento semejante a las $PM_{2.5}$, con un decremento notorio de 2012 a 2016, posteriormente, en 2017 y 2018 hay un ligero incremento en la tendencia, para volver a decrecer de 2019 al 2021, esta fracción tiene una reducción del 38 % en el periodo 2012 a 2021. Es importante resaltar que las tres fracciones presentaron un incremento en la tendencia en 2020, debido a las restricciones en las actividades ocasionadas por la pandemia COVID-19 (**Figura 4.13c, 4.14c y 4.15c**). La tendencia decreciente de estos tres contaminantes a través de los años, es resultado de la gestión de los programas ambientales instrumentados en la ZMCM.

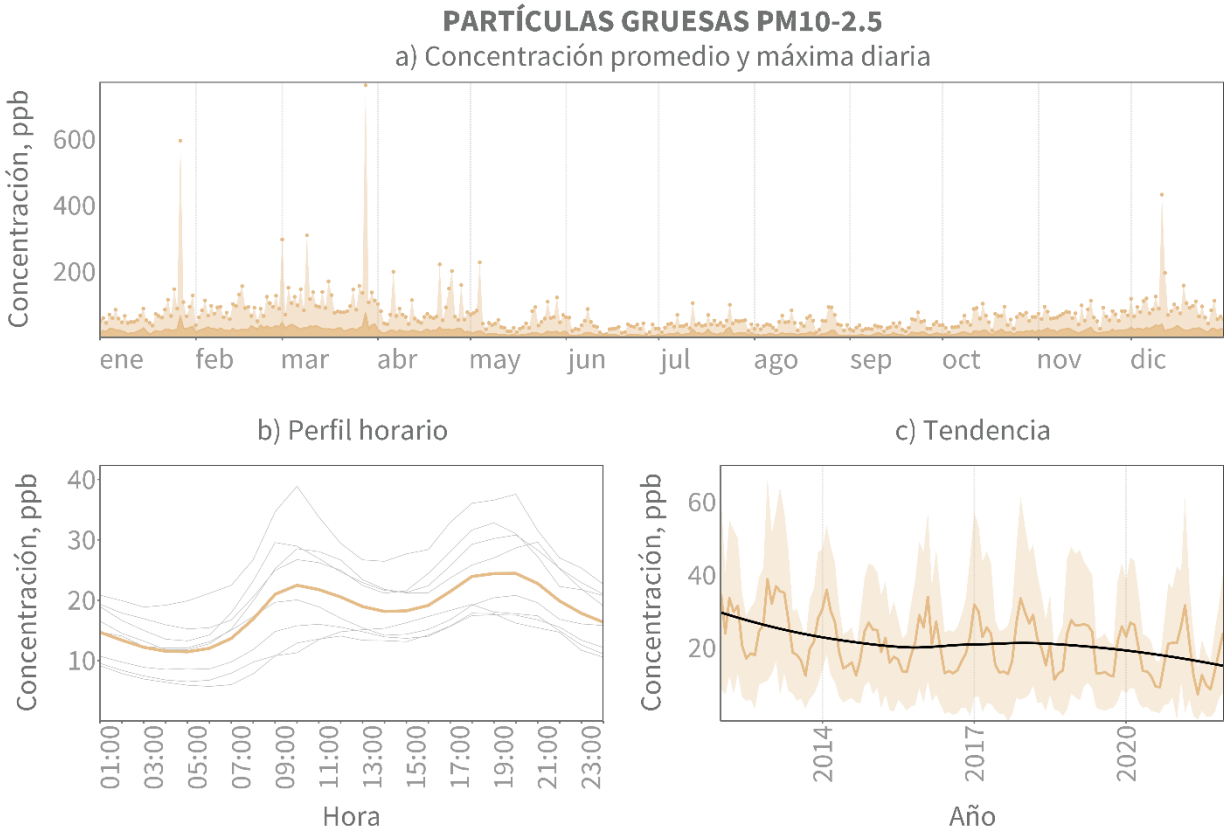


Figura 4.15. Distribución temporal de $PM_{10\text{-}2.5}$ en 2021. **a)** El promedio diario es el área en café oscuro, los puntos y el área sombreada clara son la concentración horaria máxima por día. **b)** Perfil horario, la línea café es el promedio con todas las estaciones y las líneas grises son el perfil horario por sitio. **c)** Serie de tiempo con promedios mensuales de 2012-2021. La línea café oscuro es la concentración promedio de todas las estaciones, la región sombreada en café es la desviación estándar y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

CAPÍTULO 5

Índice de calidad del aire

ÍNDICE AIRE y SALUD

El Índice actual, denominado **AIRE y SALUD**, fue publicado en 2019 en la Norma Oficial Mexicana **NOM-172-SEMARNAT-2019** y entró en vigor el 18 de febrero de 2020 a nivel nacional. El propósito del índice es informar sobre el estado de la calidad del aire, los riesgos a la salud y las medidas de protección que se deben comunicar a la población. Para obtener el índice de cada contaminante, se requiere evaluar su concentración promedio, calculada durante un periodo determinado y con el uso de un indicador específico. La relación entre la concentración y el tiempo representa el nivel de exposición a un contaminante del aire, así como sus efectos adversos sobre la salud de la población, los cuales se han reportado en diversas investigaciones epidemiológicas. En la **Tabla 5.1** se presentan los indicadores para cada contaminante evaluado en el índice AIRE y SALUD. Estos indicadores se relacionan con los criterios y límites usados para evaluar la calidad del aire establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de salud ambiental para cada contaminante. Los valores del índice de calidad del aire se agrupan en rangos de concentración y a cada rango se le asigna una categoría, un código de color, aviso de salud pública estandarizado y recomendaciones de protección (**Tabla 5.2**). La categoría **Mala** calidad del aire se asigna cuando se rebasa el valor establecido en la NOM de cada contaminante.

Se recomienda que la población en general consulte diariamente el índice, ya que la contaminación del aire puede tener efectos sobre la salud de cualquier persona; sin embargo, la mala calidad del aire es más peligrosa para los niños y adolescentes, embarazadas, personas asmáticas y con enfermedades respiratorias, mayores de 65 años, diabéticos y personas con enfermedades cardiovasculares. Incluso, los adultos sanos que se ejercitan o trabajan al aire libre pueden tener efectos en su salud. Debido a esto, es importante que toda la población considere adoptar las medidas necesarias para proteger su salud cuando la calidad del aire es **Mala**. En la ZMCM se difunde el índice de forma horaria; y desde el 2017, también se comunica a la población sobre los valores esperados para el día actual y el siguiente, esto se realiza a través del pronóstico de calidad del aire que tiene como finalidad que las personas puedan, desde un día antes, ajustar sus actividades y reducir su exposición a la contaminación; el pronóstico se puede consultar en la página de internet del SIMAT (www.aire.cdmx.gob.mx) y en la aplicación de teléfonos móviles “AIRE”.

Tabla 5.1. Indicador para el cálculo del índice AIRE y SALUD

Contaminante	Indicador
SO_2	Promedio móvil de 24 horas
NO_2	Promedio de 1 hora
CO	Promedio móvil de 8 horas
O_3	Promedio de 1 hora Promedio móvil de 8 horas
PM_{10}	Promedio móvil ponderado de 12 horas*
$PM_{2.5}$	Promedio móvil ponderado de 12 horas*

*De acuerdo con la NOM-025-SSA1-2014 debería usarse el promedio móvil de 24 horas para asignar el índice de partículas suspendidas; sin embargo, la NOM-172-SEMARNAT-2019 adoptó el promedio móvil ponderado de 12 horas (*NowCast*) de la U.S. EPA, el cual es usado para calcular el AQI (*Air Quality Index*) de Estados Unidos, ya que este indicador permite informar oportunamente a la población para que puedan tomar decisiones para reducir la exposición y proteger su salud, para el conteo de días se utiliza el promedio de 24 horas porque es el indicador que se compara con el valor normado.

Tabla 5.2. Categorías, intervalos de concentración y métricas para el Índice AIRE y SALUD.

Categoría	PM_{10} ($\mu g/m^3$) NowCast	$PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) NowCast	O_3 (ppm) 1h	O_3 (ppm) m8h	NO_2 (ppm) 1h	SO_2 (ppm) m24h	CO (ppm) m8h
Buena	0 – 50	0 – 25	0 – 0.051	0 – 0.051	0 – 0.107	0 – 0.008	0 – 8.75
Aceptable	51 – 75	26 – 45	0.052 – 0.095	0.052 – 0.070	0.108 – 0.210	0.009 – 0.110	8.76 – 11.00
Mala	76 – 155	46 – 79	0.096 – 0.135	0.071 – 0.092	0.211 – 0.230	0.111 – 0.165	11.01 – 13.30
Muy Mala	156 – 235	80 – 147	0.136 – 0.175	0.093 – 0.114	0.231 – 0.250	0.166 – 0.220	13.31 – 15.50
Ext. Mala	> 235	> 147	> 0.175	> 0.114	> 0.250	> 0.220	>15.50

NowCast: promedio móvil ponderado de 12 horas
1h: promedio horario
m8h: promedio móvil de 8 horas
m24h: promedio móvil de 24 horas

Es importante mencionar que el índice AIRE y SALUD utiliza datos de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), que tiene 34 estaciones en total; sin embargo, el índice solamente se reporta en 27 sitios, los cuales tienen el objetivo de monitoreo de "Informar y prevenir a la población sobre los niveles de contaminación en zonas representativas y sus posibles riesgos a través del índice de calidad del aire", mientras que las cinco estaciones restantes (ACO, INN, MPA, AJU y MON) son consideradas de transporte ya que su objetivo es "generar información para la evaluación del transporte de contaminantes urbanos y la evaluación de concentraciones de fondo", y están ubicadas en los límites de la zona urbana.

En los resultados del análisis del Índice AIRE y SALUD durante 2021 en la ZMCM (Figura 5.1), considerando los contaminantes: O_3 (1h) + O_3 (8h) + PM_{10} (24h) + $PM_{2.5}$ (24h) + NO_2 (1h) + SO_2 (m24h); se registró un total de 135 días limpios en el año (37 %), en los cuales ningún contaminante alcanzó la categoría de mala calidad del aire. En los 230 días restantes (63 %), uno o más contaminantes superaron el valor de su NOM, de los cuales, 175 días corresponden a la categoría **Mala** calidad del aire; 49 en **Muy Mala** y 6 días en la categoría **Extremadamente Mala**. Estos días en la última categoría están relacionados con los máximos del promedio móvil de 8 horas de O_3 que se presentaron en febrero y abril, cuando hubo eventos con tres a cuatro horas continuas con máximos mayores a 0.140 ppm. El comportamiento mensual del Índice con respecto al número de días limpios, muestra que junio tuvo 21 días con mejor calidad del aire con 5 días en categoría **Buena** y 16 en **Aceptable**; mientras que diciembre fue el mes con peor calidad del aire ya que presentó 24 días con **Mala** y 6 en **Muy Mala** calidad del aire.

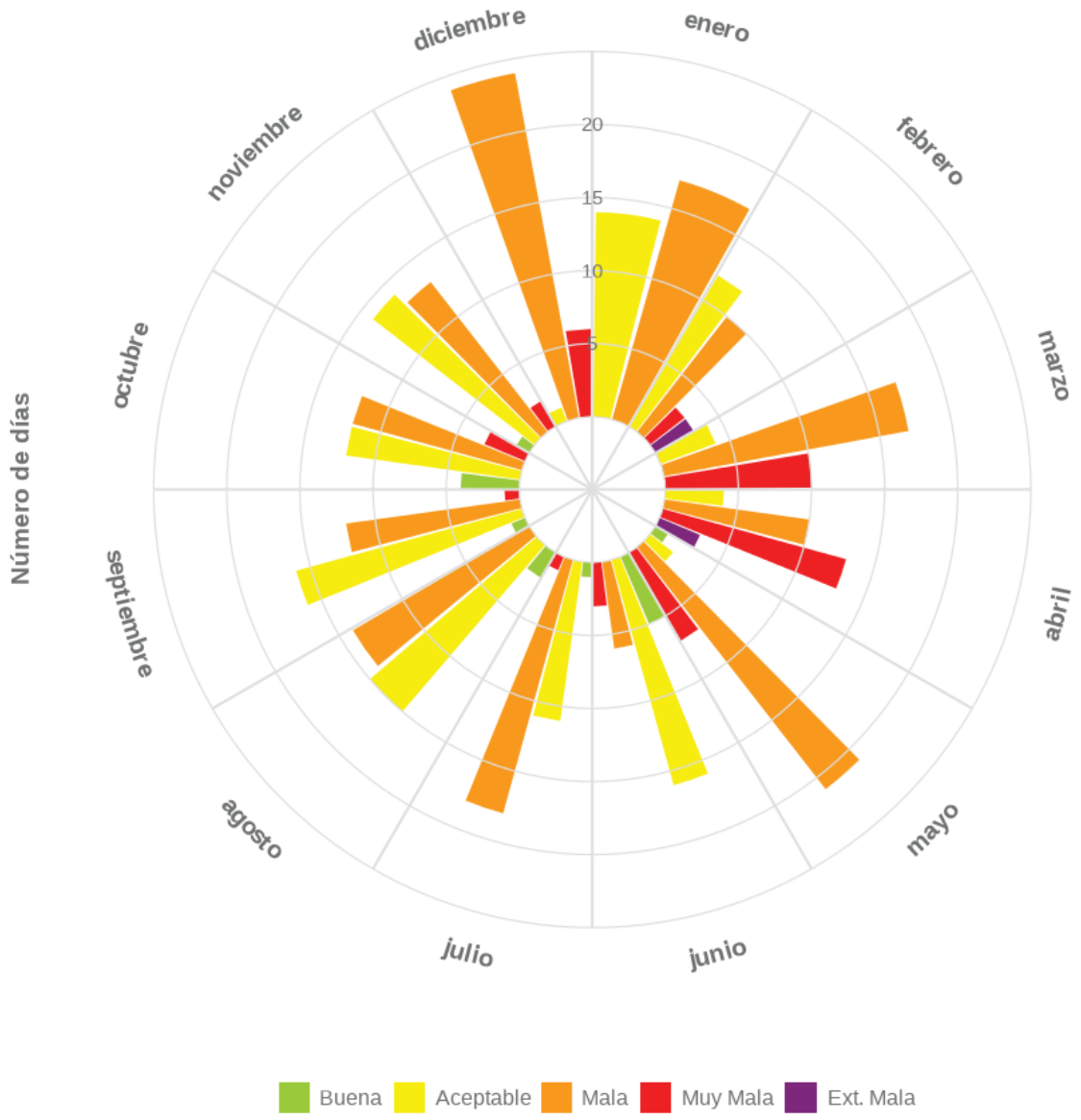


Figura 5.1. Comportamiento del Índice AIRE y SALUD para 2021 considerando todos los contaminantes.

En el análisis por contaminante (**Figura 5.2**), el ozono presentó mayor número de días con **Mala** calidad del aire con un total de 204, mientras que PM_{10} fueron 101 y 13 días en $PM_{2.5}$, los demás contaminantes NO_2, SO_2 y CO no registraron días con **Mala** calidad del aire. De acuerdo a la NOM-172-SEMARNAT-2019, el índice de ozono es combinado (máximo horario y promedio móvil de 8 horas) y para determinar la calidad del aire, se reporta la categoría más alta entre ambas métricas, considerando esto, el ozono obtuvo **Mala** calidad del aire durante todo 2021 y los meses de la temporada de ozono (marzo a mayo) presentaron más días contaminados. Por el contrario, enero y junio registraron menos días con calidad del aire **Mala** o **Muy Mala**, con nueve cada uno(**Figura 5.2a**).

El índice de $PM_{2.5}$ se mantuvo en calidad del aire **Aceptable** en la mayoría del año; en los meses de febrero, abril, junio y diciembre, se presentaron días con **Mala** calidad del aire y sólo se alcanzó la categoría **Muy Mala** durante el 25 de diciembre debido al uso de pirotecnia por la navidad (**Figura 5.2b**).

En las partículas PM_{10} se observó que la época seca fue la más contaminada ya que se presentaron más días con **Mala** calidad del aire, debido al predominio de condiciones de estabilidad atmosférica, mayor frecuencia de inversiones térmicas, propagación de incendios y re suspensión de partículas por falta de precipitación. En este contaminante solamente se registró un día con **Muy Mala** calidad del aire y fue ocasionado por un evento de viento muy fuerte (28 de marzo) que afectó y provocó que todas las estaciones registraran valores altos de partículas. El mes con la peor calidad del aire en PM_{10} fue diciembre, mientras que la época de Lluvias (junio a octubre), fue la más limpia ya que predominó la calidad del aire **Buena** o **Aceptable** (**Figura 5.2c**).

Por último, en el índice de SO_2 no hubo días con MALA calidad del aire, y la categoría **Buena** tuvo mayor cantidad de días en agosto, mientras que noviembre registró menos días en esta categoría (**Figura 5.2d**).

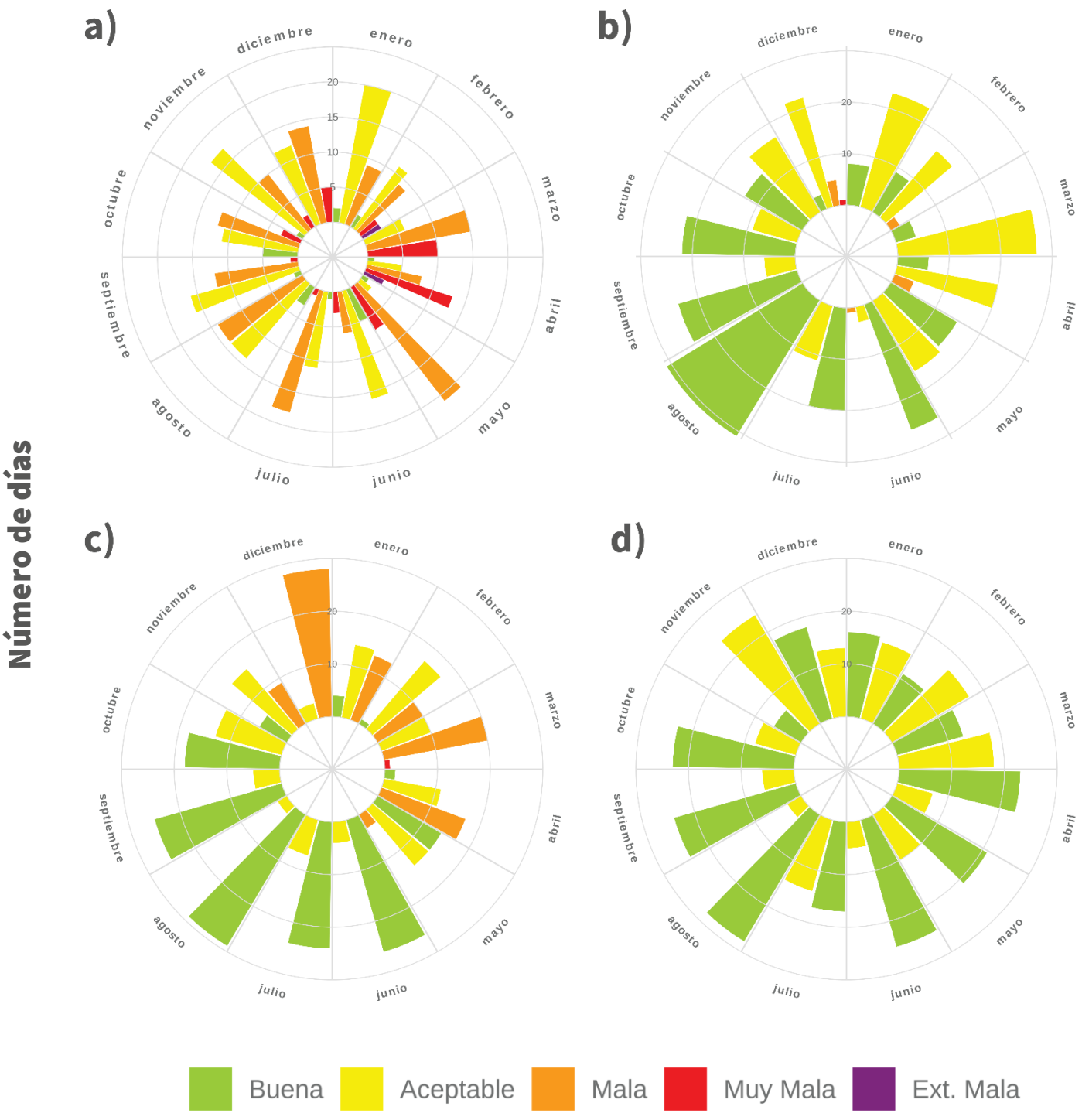


Figura 5.2. Comportamiento del Índice AIRE y SALUD para: **a)** O_3, **b)** $PM_{2.5}$, **c)** PM_{10} y **d)** SO_2

En la comparación del índice por entidad federativa y considerando todos los contaminantes, la CDMX tuvo 201 días con **Mala** calidad del aire y las estaciones en EDOMEX registraron 197 días. A nivel contaminante, el ozono en la CDMX presentó 48 días más en la categoría **Mala**, en comparación con el EDOMEX, esta diferencia representa un 27 % de días más. Este comportamiento del ozono es normal en la CDMX, debido a que la mayor emisión de los precursores del ozono (NO_x y COV) es en el norte y centro de la ZMCM; posteriormente el transporte y formación del O_3 se realiza con el desplazamiento de las masas de aire, que frecuentemente son del norte al sur, donde se acumula el contaminante debido a la barrera natural de la Sierra de Ajusco-Chichinautzain, por lo que los sitios de monitoreo ubicados al sur de la CDMX registran los valores más altos.

En el caso de las partículas, en EDOMEX las PM_{10} presentaron 99 días con **Mala** calidad del aire y uno en la categoría **Muy Mala**, en comparación con la CDMX que registró 24 días con **Mala** calidad del aire. En la CDMX, las $PM_{2.5}$ obtuvieron nueve días en la categoría **Mala** y uno con **Muy Mala** calidad del aire, mientras que el EDOMEX registró nueve días la categoría **Mala**, es decir, un día menos (Figura 5.3).

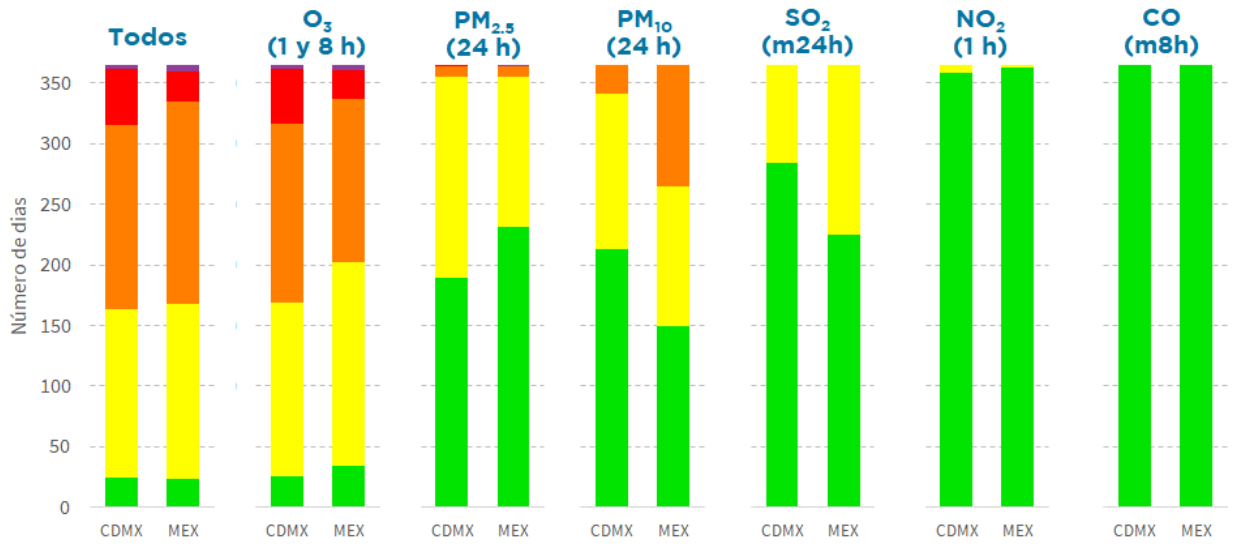


Figura 5.3. Comparación del Índice AIRE y SALUD para 2021 por entidad federativa.

En comparación con el 2020 (Tabla 5.3), la categoría **Mala** calidad del aire en ozono (indicador horario) tuvo una disminución de 21 días (11 %) en la CDMX, a diferencia del EDOMEX, donde se registró un aumento de 32 días (32 %). En las PM_{10}, la CDMX y el EDOMEX tuvieron incrementos de 2 (11 %) y 38 (61 %) días, respectivamente; mientras que en las $PM_{2.5}$, la CDMX registró un día más (11 %) con respecto al 2020, en cambio en el EDOMEX se observó un incremento de tres días (50 %).

El aumento de días con **Mala** calidad del aire por partículas fue debido a la reapertura de algunas actividades después de las fuertes restricciones en 2020 por la pandemia, ya que, si se compara con un año sin pandemia como 2019, se observarían reducciones, debido a que en 2021 todavía no se normalizaban todas las actividades. La disminución en ozono fue ocasionada por el régimen de formación que domina en la ZMCM, el cual es sensible a COV y al presentarse un incremento de emisiones de NO_x, se reduce la concentración del O_3, como se ha mencionado en diversos estudios, en los informes anuales pasados, así como en la sección del ozono en el capítulo 4 de este informe.

Tabla 5.3. Comparación del número de días con categoría MALA o superior del 2020 al 2021 por contaminante y entidad

Contaminante	Entidad	Número de días con calidad del aire Mala		Diferencia de días (2021-2020)	Porcentaje de cambio (%)
		2020	2021		
Ozono (O_3)	CDMX	200	179	-21	-11 ↓
	EDOMEX	99	131	32	32 ↑
PM_{10}	CDMX	19	21	2	11 ↑
	EDOMEX	62	100	38	61 ↑
$PM_{2.5}$	CDMX	9	10	1	11 ↑
	EDOMEX	6	9	3	50 ↑

El análisis del **Índice de Riesgo para Personas Susceptibles (IRPS)** durante 2021 muestra claramente los días con niveles altos en las métricas del promedio móvil de 8 horas de O_3 y promedio de 24 horas de las $PM_{2.5}$. El riesgo **Moderado** (4 a 6 de la escala del IRPS) presentó más días con 249, seguido por riesgo **Bajo** (IRPS: 1 a 3) con 82 y el riesgo **Alto** (7 a 9) se registró en 34 días, de estos últimos, la mayoría ocurrieron en los meses de la temporada de ozono (febrero a junio) y en diciembre.

Los días más críticos fueron del 21 al 30 de abril, en los cuales se declararon dos contingencias por ozono (21 y 26 de abril) y se presentaron valores del IRPS entre 7 y 9, correspondientes al riesgo **Alto**, que fue más alto para el 24 de abril. Este índice tiene como objetivo alertar a la población sensible a la contaminación y que tomen medidas para evitar la exposición a concentraciones altas, y así, aunque la contingencia dure solamente un día, el IRPS puede advertir un riesgo **Alto** para las personas susceptibles con riesgo de tener efectos negativos en su salud. Así mismo, el IRPS responde cuando la concentración es baja, ya que se obtienen valores menores durante la época de lluvia, que es la más limpia (**Figura 5.4**).

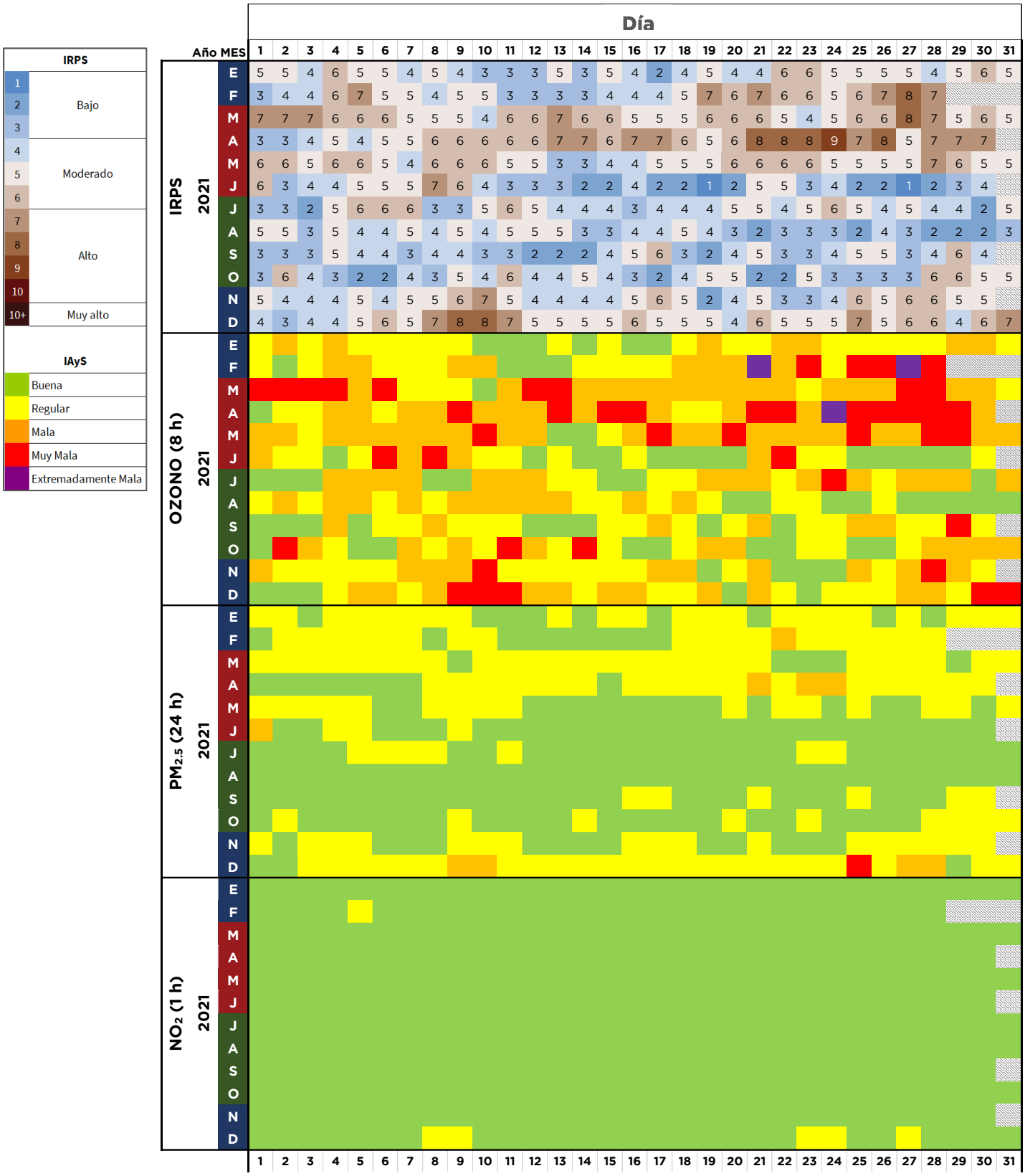


Figura 5.4. Comportamiento del IRPS en 2021 y comparación con el índice AIRE y SALUD de O_3 (8 h), $PM_{2.5}$ (24 h) y NO_2 (1 h)

CAPÍTULO 6

Eventos de alta concentración

Las contingencias atmosféricas son eventos transitorios que ocurren cuando hay una combinación de condiciones específicas de meteorología y emisiones, que tienen como consecuencia un incremento repentino de la concentración de contaminantes en el aire. Estos niveles altos son nocivos y pueden ocasionar efectos en la salud de la población, especialmente en grupos que son más susceptibles a la contaminación, por ejemplo, los niños, adultos mayores y personas con alguna enfermedad respiratoria o cardiaca preexistente. Por esta razón, diversos países han creado planes de contingencia o emergencia ambiental, con el objetivo de mitigar las emisiones de contaminantes durante un evento de alta concentración y así, minimizar los efectos en la salud.

En general, un programa de contingencia establece criterios específicos para determinar la activación de un episodio de emergencia, mediante umbrales o límites de concentración que indican cuando comenzar con las acciones para reducir las emisiones durante un evento de alta concentración, además se informa a la población para que también tome medidas para proteger su salud.

En la ZMCM se han creado planes de contingencia atmosférica desde la década de los noventas y en cada nuevo plan, se actualizan los umbrales para activar una contingencia con la finalidad de ser cada vez más protectores a la salud y así, reducir las emisiones en mayor proporción. En la **Figura 6.1** se presenta la evolución de los umbrales dentro de los programas de contingencias atmosféricas de la ZMCM y se puede observar que los umbrales se han hecho más estrictos a través del tiempo. En una comparación con el primer plan de contingencia, la actualización del 2019 representa una reducción del 47 % en umbral de ozono para la Fase I (FI) y del 51 % para la Fase II (FII).

En el caso de PM_{10}, el umbral de FI se redujo en 29 % y en 39 % para la FII, con respecto a su primer plan de 1998. Además, en el último programa de contingencia, se incluyen niveles de activación para $PM_{2.5}$ y una fase combinada (O_3 + partículas), esto en consecuencia de los eventos de incendios durante mayo del 2019 que ocurrieron en el centro del país. Las fases del plan de contingencia vigente en 2021 se describen en la **Tabla 6.1**.

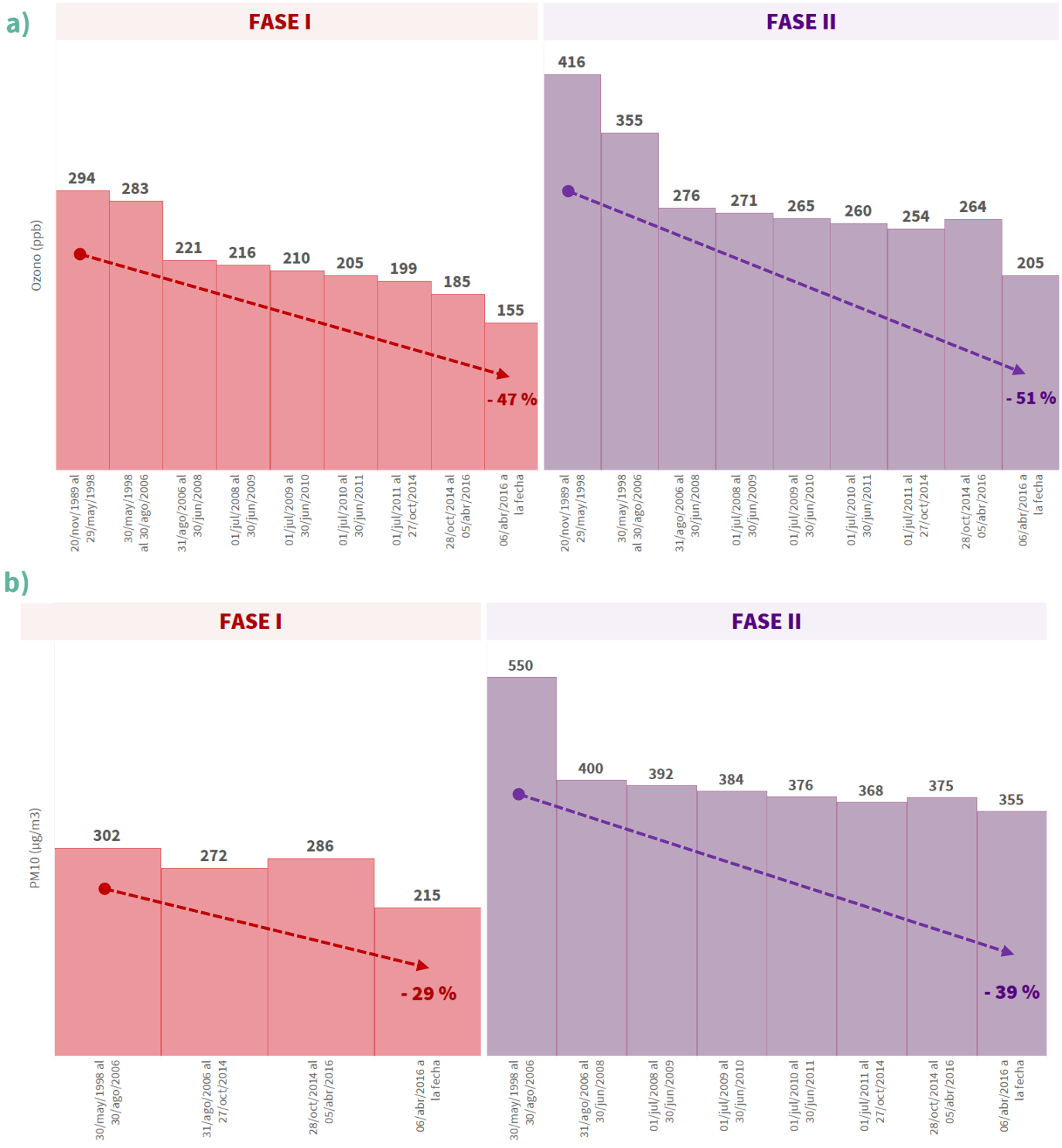


Figura 6.1. Evolución de los umbrales de los Programas de contingencia ambiental atmosférica en la ZMCM. **a)** Ozono. **b)** PM_{10}

Tabla 6.1. Programa de contingencia ambiental atmosférica vigente en 2021

A) FASES PREVENTIVAS

CONTAMINANTE	ACTIVACIÓN	SUSPENSIÓN
Ozono	Pronóstico O_3 > 142 ppb Probabilidad de ocurrencia del 70 %.	Al día siguiente a las 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 FI 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 si hay 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 PPRECCA es vigente a partir del 29 de mayo de 2019.

Durante 2021 se presentaron cuatro eventos de contingencia atmosférica, de los cuales tres fueron ocasionados por O_3 y uno por $PM_{2.5}$. En la **Figura 6.2** se presenta la cronología de cada episodio de contingencia, los eventos de O_3 ocurrieron en abril y junio, dentro de la temporada de ozono (15 de febrero al 15 de junio); mientras que el de $PM_{2.5}$, se registró durante la temporada seca-fría, en las festividades navideñas y de año nuevo, esto es causado por el uso de pirotecnia, lo cual se ha intentado mitigar con distintas campañas de difusión del Gobierno de la Ciudad de México para reducir y evitar la quema excesiva de material pirotécnico; sin embargo, continúa la problemática en dichas fechas.

El primer evento de ozono (21 de abril) tuvo una concentración de activación de 160 ppb, en la estación Tultitlán, ubicada en EDOMEX y esta contingencia terminó al día siguiente, 22 de abril. El segundo evento de O_3 también tuvo una duración de dos días (26 al 27 de abril), con una concentración de activación de 159 ppb en el sitio Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA), al sur de la CDMX. El último evento de ozono ocurrió el 8 de junio, este evento fue el más corto, ya que se activó y desactivó en el mismo día, en el que se alcanzó un máximo de 157 ppb en CCA; sin embargo, durante la tarde se incrementó la velocidad del viento y la cantidad de lluvia, esto ocasionó una disminución notable de los niveles de ozono. La contingencia de partículas $PM_{2.5}$ durante el 25 y 26 de diciembre, se activó con una concentración de 99.9 µg/m^3 (promedio móvil de 24 horas) en la estación Santiago Acahualtepec (SAC), en el sureste de la ZMCM. En las siguientes secciones de este capítulo, se presenta la descripción detallada de estos cuatro eventos de contingencia.

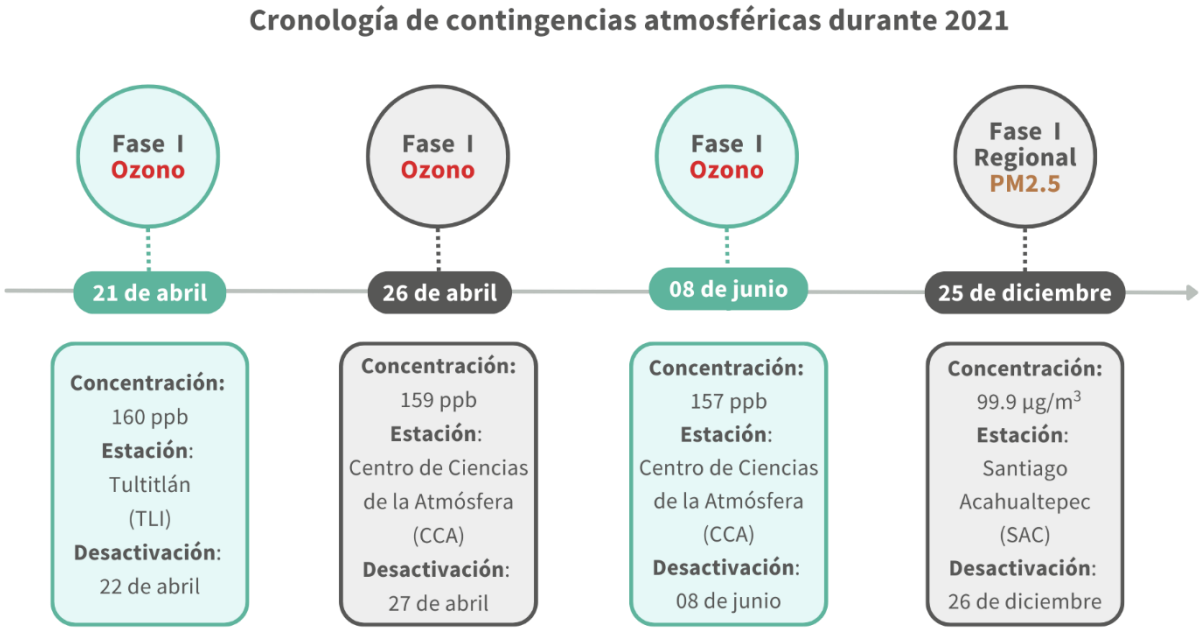


Figura 6.2. Cronología de los eventos de contingencia ambiental atmosférica en la ZMCM durante 2021

21 DE ABRIL: FASE I DE OZONO

Este primer episodio de Fase I ($O_3 \geq 155$ ppb) registró una duración total de dos días, la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAMe) activó la contingencia el 21 de abril y la finalizó en la noche del 22 de abril. La concentración de O_3 fue alta en ambos días (**Figura 6.3**); sin embargo, solamente se alcanzaron valores de contingencia durante el 21 de abril.

Durante el 21 de abril, la concentración de O_3 superó la NOM y la categoría MALA del IAS desde las 13:00 h, con un máximo de 96 ppb en la estación CCA, al sur de la CDMX. En las siguientes horas, la concentración continuó en ascenso, por lo que una mayor cantidad de sitios registraron valores superiores al límite normado. A las 15:00 h, el máximo fue 126 ppb en la estación Benito Juárez (BJU) y a esta hora, 14 sitios superaron la NOM. El máximo del día se alcanzó a las 17:00 h con una concentración de 160 ppb en la estación TLI, además, a esta hora otros 6 sitios superaron el umbral de la norma. Debido a estos valores y a las condiciones meteorológicas adversas, la CAMe activó la Fase I de contingencia. En las horas previas a este máximo horario, se observó que la concentración incrementó en la región centro y norte de la ZMCM, esto debido la formación de zonas de confluencia de vientos, que transportaban contaminantes precursores y favorecieron la acumulación de O_3 en dichas regiones (**Figura 6.4**). Los máximos alcanzados durante este día fueron consecuencia de un sistema de alta presión posicionado en el centro del país que ocasionó estabilidad atmosférica con escasa ventilación, junto con la intensa radiación solar y baja nubosidad propia de la temporada; estas condiciones meteorológicas adversas, favorecieron la producción y estancamiento de O_3. A las 18:00 h, la concentración descendió y el máximo fue 147 ppb en TLI; para la siguiente hora (19:00 h), los valores de O_3 en todos los sitios fueron menores a la NOM, con un máximo de 73 ppb en CCA.

En el siguiente día (22 de abril), la NOM se superó desde las 13:00 h, con una concentración máxima de 109 ppb en la estación Nezahualcóyotl (NEZ), ubicada en el noreste de la ciudad, y a esta hora, un total de 8 sitios de monitoreo superaron el límite normado. A las 15:00 h, la concentración continuó en aumento y 15 estaciones rebasaron la NOM, con un máximo de 143 ppb en el sitio FES Acatlán (FAC). El valor más alto del día fue a las 17:00 h con 146 ppb en la estación TLI, ubicada en el norte de la ZMCM. Después de esta hora, la concentración disminuyó y a las 19:00 h, todas las estaciones registraron valores menores al límite de la NOM; por lo tanto, la CAMe suspendió la Fase I de contingencia a las 20:00 h, debido a que durante el día ya no se superó el umbral de contingencia (154 ppb) y además, la información meteorológica para el siguiente día indicaba un debilitamiento del sistema de alta presión, así como su traslado hacia el Pacífico (CAMe, 2021), en consecuencia, se pronosticaban mejores condiciones para la dispersión de contaminantes en la ZMCM.

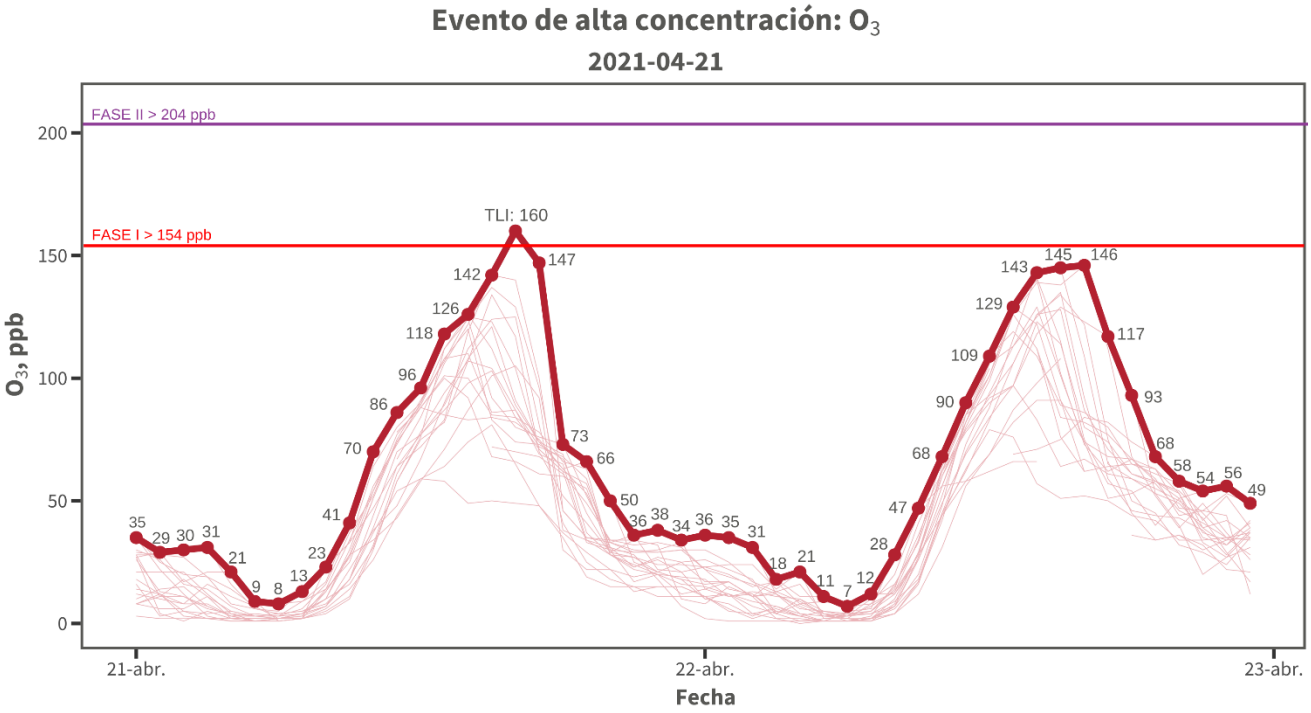


Figura 6.3. Concentración de O_3 del 21 al 22 de abril. Las líneas delgadas corresponden a la concentración horaria por estación y la línea gruesa resalta los máximos por hora. Las líneas horizontales son las Fases I y II del programa de contingencia.

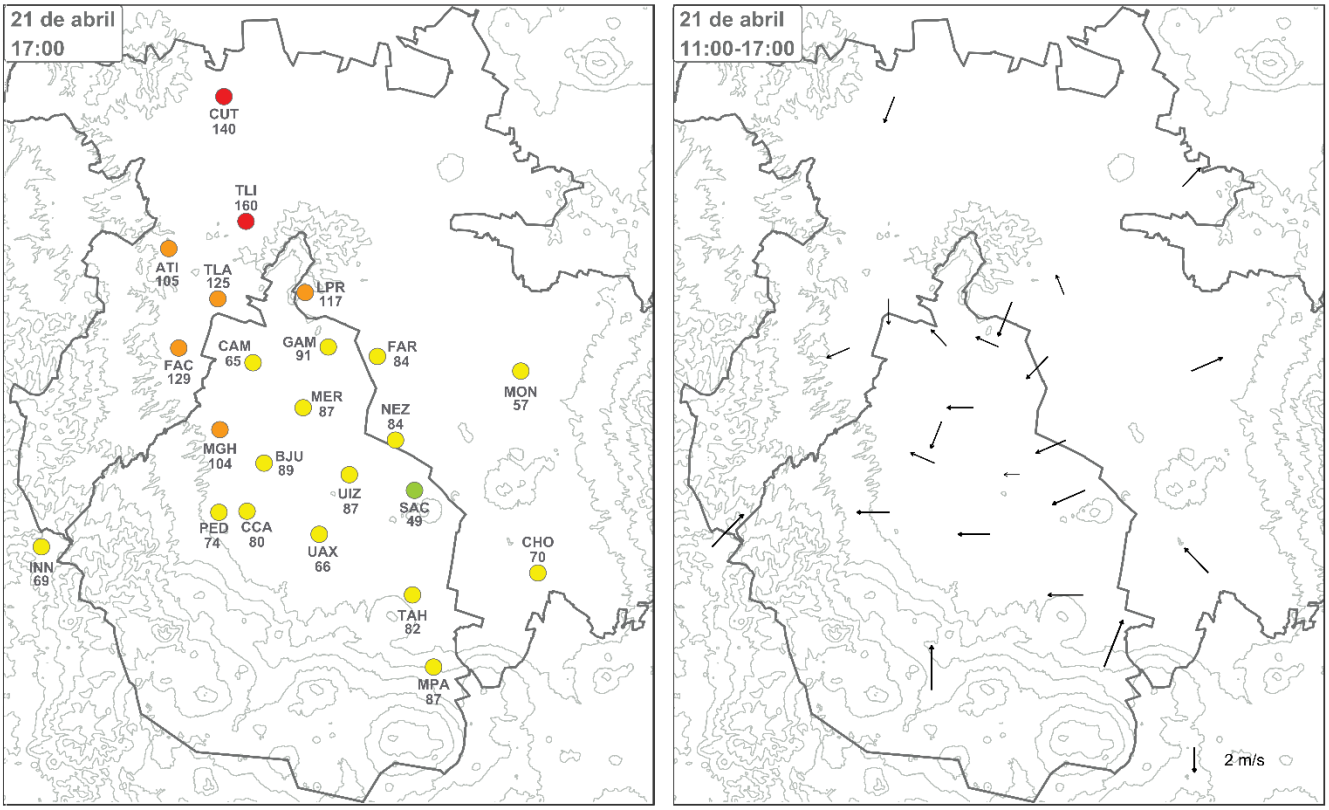


Figura 6.4. Máximo de O_3 (ppb) con su categoría (color) del Índice AIRE y SALUD a las 17:00 h (izquierda). Vector promedio del viento del 21 de abril entre las 11:00 y 17:00 h (derecha).

26 DE ABRIL: FASE I DE OZONO

El 26 de abril se declaró la segunda contingencia Fase I de O_3, cuatro días después de que terminó el primer evento de FI del 2021. Este episodio también tuvo una duración de dos días (**Figura 6.5**), con los valores más altos en el día de su activación.

La concentración de ozono durante el 26 de abril superó la NOM desde las 12:00 h, con un máximo de 102 ppb en la estación Gustavo A. Madero (GAM). A las 14:00 h, el valor más alto se registró en el sitio BJU con 139 ppb y otras 13 estaciones excedieron el límite normado. El umbral de FI de contingencia se rebasó a las 15:00 h con un máximo de 159 ppb en CCA y en este momento, un total de 14 sitios superaron la NOM. Estos valores altos fueron causados por un sistema de alta presión, el cual provocó estabilidad atmosférica con vientos débiles (< 8 m/s) y cielos despejados; debido a esto, la CAMe emitió el comunicado en el que activaba las acciones de la Fase I del programa de contingencia. En horas previas al valor de FI (09:00 – 15:00 h), se observaron vientos de norte hacia el sur, además se formaron zonas de confluencia en noreste y centro de la ZMCM (**Figura 6.6**), este patrón de vientos favoreció que la concentración incrementara principalmente en el norte, centro y sur, como fue en las estaciones GAM, BJU y el máximo en CCA. En las siguientes horas, los niveles comenzaron a descender y a las 16:00 h, el máximo fue en BJU con 138 ppb, mientras que a las 17:00 h ya fue de 122 ppb en el sitio Miguel Hidalgo (MGH), para esta última hora, un total de 6 estaciones registraron valores superiores a la NOM. Finalmente, a las 18:00 h el máximo fue 93 ppb en MGH, por lo que ningún sitio rebasó el límite normado.

En el siguiente día (27 de abril), la concentración rebasó la NOM desde las 13:00 h, con un máximo de 125 ppb en MGH y un total de 9 estaciones excedieron el límite normado. La concentración más alta en este día fue 129 ppb en BJU a las 15:00 h, para este momento, 10 estaciones registraron valores mayores a la NOM. En las siguientes horas, los niveles de ozono disminuyeron; a las 18:00 h, se registró un máximo de 120 ppb en CCA y en otras 5 estaciones se superó la NOM. En este momento, la CAMe suspendió la contingencia debido a que el valor más alto del día no rebasó el umbral de Fase I y los datos en las estaciones de monitoreo continuaban en descenso. Adicionalmente, la revisión del pronóstico meteorológico del día siguiente presentaba una mayor intensidad de viento, ya que el sistema anticiclónico se trasladó fuera de la ZMCM.

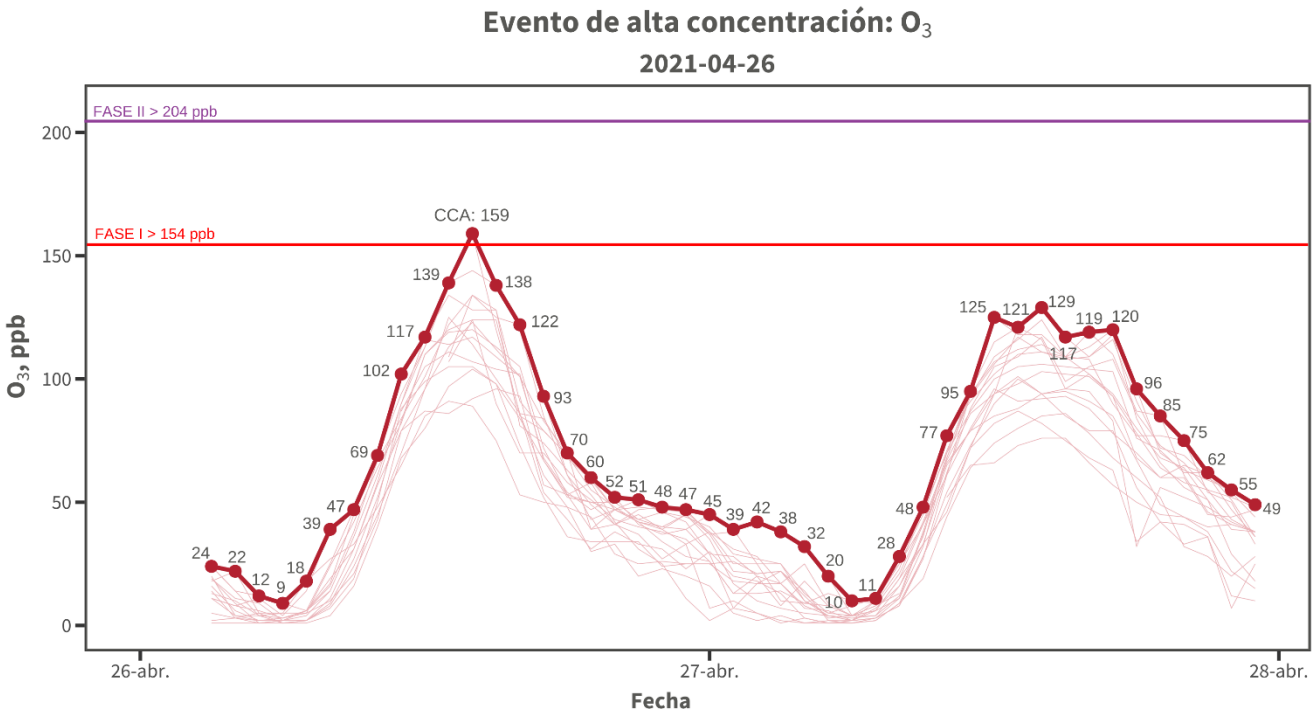


Figura 6.5. Concentración de O_3 del 26 al 27 de abril. Las líneas delgadas corresponden a la concentración horaria por estación y la línea gruesa resalta los máximos por hora. Las líneas horizontales son las Fases I y II del programa de contingencia.

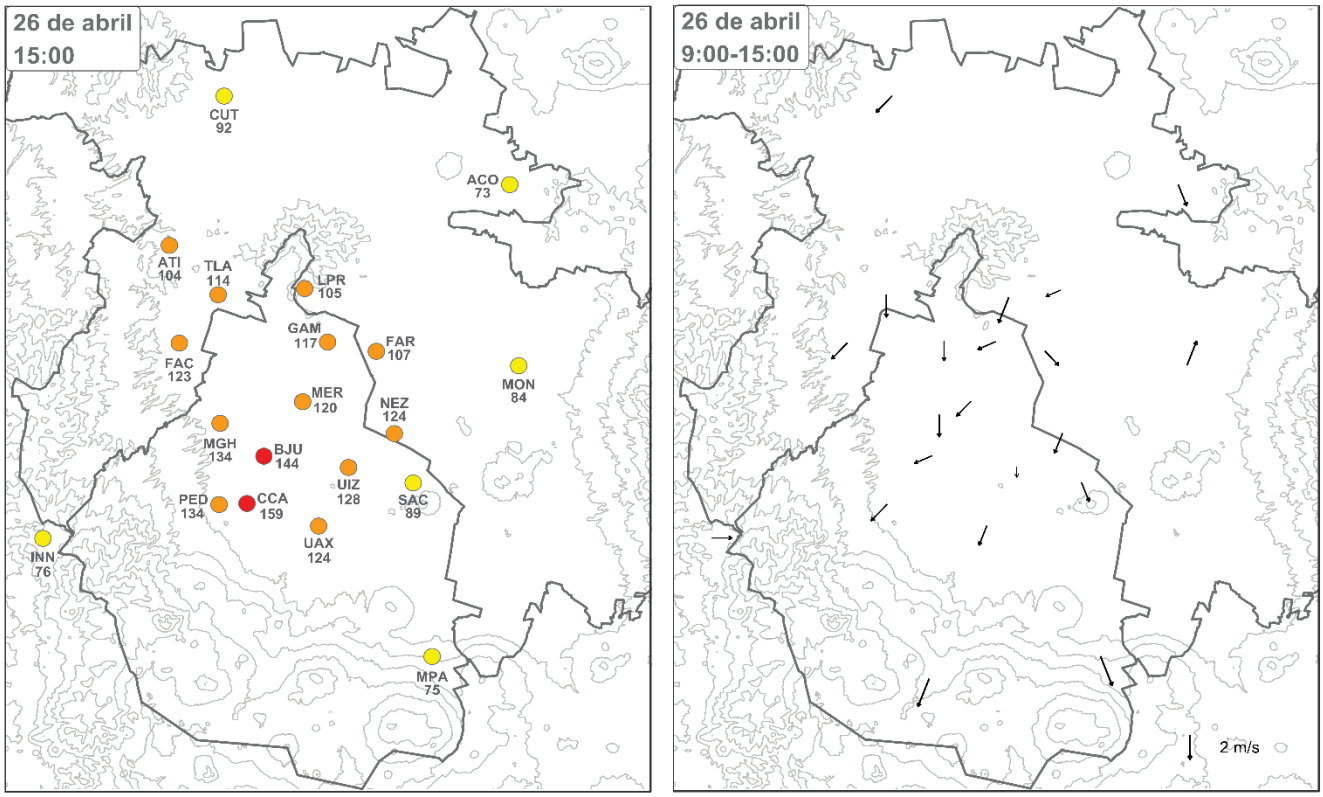


Figura 6.6. Máximo de O_3 (ppb) con su categoría (color) del Índice AIRE y SALUD a las 15:00 h (izquierda). Vector promedio del viento del 26 de abril entre las 09:00 y 15:00 h (derecha).

08 DE JUNIO: FASE I DE OZONO

El tercer y último episodio de contingencia de ozono ocurrió el 8 de junio del 2021, este evento fue el más corto por que se activó y suspendió durante el mismo día, debido a la presencia de lluvias moderadas a intensas en la mayor parte de la zona metropolitana.

En el comportamiento de la concentración de ozono en este evento (**Figura 6.7**), se observó que desde las 13:00 h se superó la NOM con un máximo de 119 ppb en la estación CCA. En la siguiente hora (14:00 h), 17 sitios en total rebasaron el límite normado, con el valor más alto en UAM Iztapalapa (UIZ) con 146 ppb. El umbral de FI de contingencia se superó a las 15:00 h, con un máximo de 157 ppb en CCA y otras 16 estaciones registraron valores mayores a la NOM, por lo que, en este momento, la CAMe activó la Fase I del programa de contingencia. Para la siguiente hora (16:00 h), la concentración incrementó y se alcanzó un máximo de 158 ppb en la estación Santa Fe (SFE), con un total de 12 sitios que excedían el umbral de la NOM. En las horas previas a estos niveles de ozono, de 09:00 a 15:00 h, se observaron vientos de intensidad débil con dirección predominante del norte hacia el sur (**Figura 6.8**), adicionalmente se presentó estabilidad atmosférica con cielo despejado y alta radiación solar, estas condiciones meteorológicas favorecieron la generación y acumulación del ozono en el suroeste de la CDMX donde se presentaron los valores de contingencia por dos horas consecutivas, en las estaciones CCA y SFE.

A las 17:00 h, en la mayoría de los sitios se observó una tendencia de reducción en la concentración, ocasionada por la presencia de lluvias moderadas a fuertes, incluso con granizo y tormentas eléctricas en la mayor parte de la ZMCM. Durante las siguientes horas, la concentración disminuyó considerablemente y el máximo observado a las 19:00 h fue 79 ppb en SFE, por lo que ninguna estación superó el límite normado. La CAMe suspendió la FI de contingencia atmosférica a las 20:00 h, debido a las condiciones de lluvia que se presentaron en la tarde del 8 de junio, adicionalmente con el análisis del pronóstico meteorológico para el siguiente día, se estimó que las condiciones de precipitación serían similares y el comportamiento de los vientos, serían favorables para la dispersión de contaminantes (CAMe, 2021).

Para el 9 de junio a las 13:00 h, se registró un máximo de 116 ppb en Chalco (CHO) y un total de 8 sitios presentaron valores superiores a la NOM. La concentración más alta del día fue a las 14:00 h, con 135 ppb en BJU y otras 11 estaciones rebasaron el límite normado. A partir de las 17:00 h, todos los sitios registraron valores menores a la NOM, con el máximo en SFE con 75 ppb.

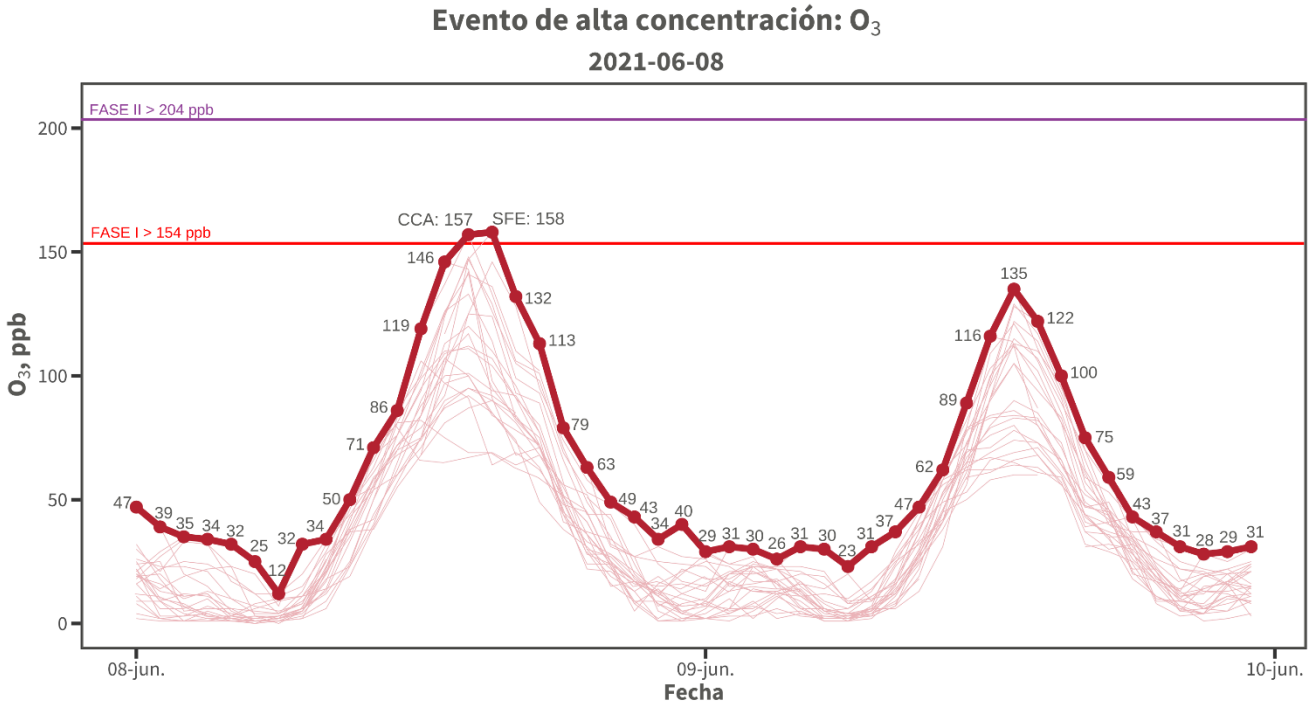


Figura 6.7. Concentración de O_3 del 8 al 9 de junio. Las líneas delgadas corresponden a la concentración horaria por estación y la línea gruesa resalta los máximos por hora. Las líneas horizontales son las Fases I y II del programa de contingencia.

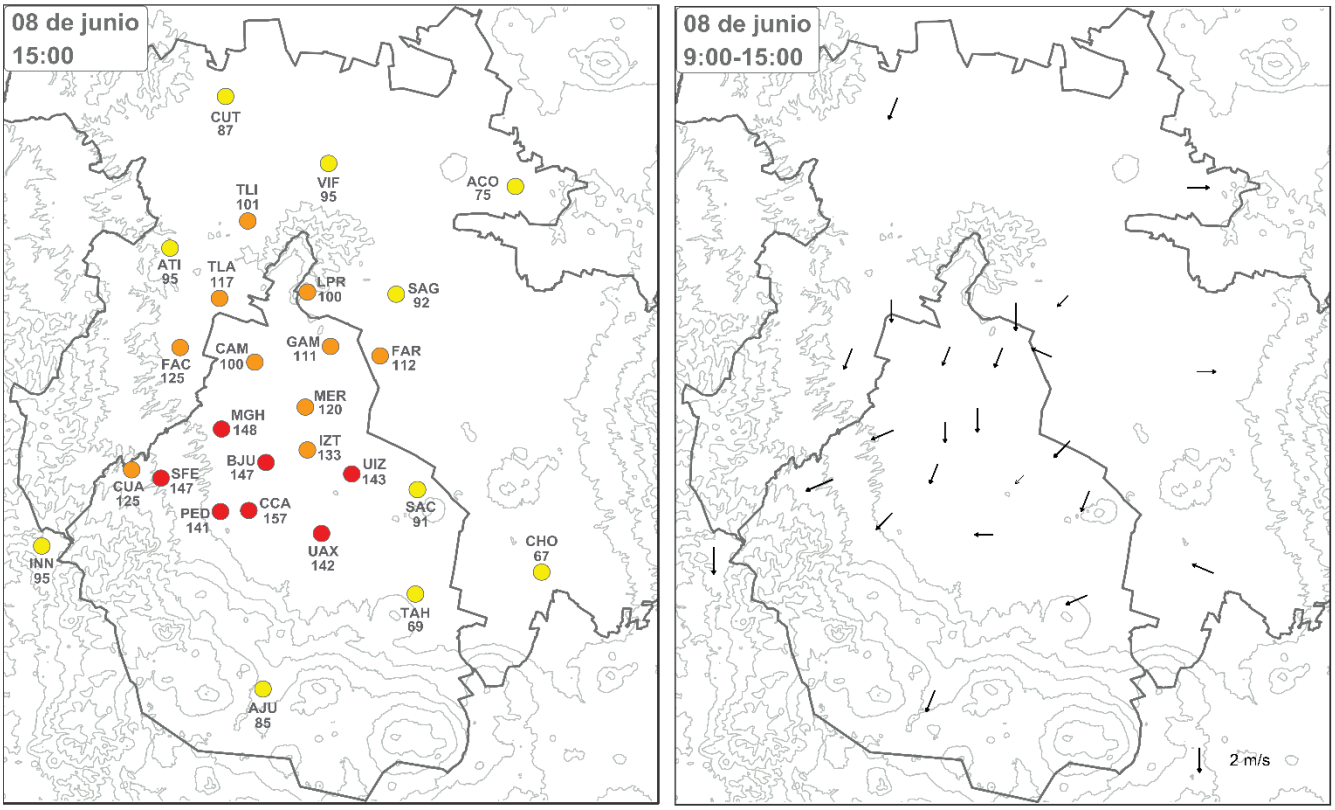


Figura 6.8. Máximo de O_3 (ppb) con su categoría (color) del Índice AIRE y SALUD a las 15:00 h (izquierda). Vector promedio del viento del 08 de junio entre las 09:00 y 15:00 h (derecha).

25 DE DICIEMBRE: FASE I REGIONAL DE $PM_{2.5}$

La única contingencia de partículas fue ocasionada por $PM_{2.5}$ durante el 25 de diciembre del 2021. Los valores altos de partículas son comunes en las fechas navideñas y de año nuevo, debido al uso excesivo de pirotecnia, en consecuencia, estas emisiones ocasionan que los niveles de partículas se incrementen. Adicionalmente, de noviembre a febrero es la temporada seca fría, en la cual se presentan condiciones meteorológicas que favorecen el estancamiento de contaminantes, como son las inversiones térmicas, que son más frecuentes y de mayor duración en esta época del año.

En la **Figura 6.9**, se presenta el comportamiento del 24 al 27 de diciembre para los máximos de tres indicadores de $PM_{2.5}$: el dato horario (línea gris oscuro); el promedio móvil ponderado de 12 horas o NowCast (línea gris claro) y el promedio móvil de 24 horas (cuadros color verde), este último es el indicador que activa las contingencias de $PM_{2.5}$ cuando supera 97.4 µg/m³. Se puede observar que durante la madrugada del 25 de diciembre, las $PM_{2.5}$ incrementaron considerablemente y a las 03:00 h, el dato horario alcanzó un máximo de 189 µg/m³, mientras que el NowCast registró 136 µg/m³, ambos máximos se presentaron en la estación Santiago Acahualtepec (SAC).

Los valores de los indicadores horario y NowCast incrementaron en las siguientes horas; a las 06:00 h, el máximo horario fue 214 µg/m³ y el valor más alto del NowCast fue 183 µg/m³, ambos en SAC. Para las 09:00 h se registró un ligero descenso en los indicadores horario y NowCast, ya que sus máximos fueron 140 µg/m³ y 163 µg/m³, respectivamente. Sin embargo, en las siguientes horas se alcanzaron los valores más altos del día para ambos indicadores, a las 11:00 h el máximo horario registró 256 µg/m³ y el NowCast obtuvo 232 µg/m³. En esta misma hora, el promedio móvil de 24 horas, presentó un máximo de 99.9 µg/m³, el cual superó el umbral de contingencia (97.4 µg/m³), por lo que la CAMe activó la Fase I regional por $PM_{2.5}$ en el sureste de la ZMCM, que comprende las Alcaldías Iztapalapa, Milpa Alta, Tláhuac, Xochimilco; y los Municipios de: Amecameca, Atlautla, Ayapango, Chalco, Cocotitlán, Ecatzingo, Juchitepec, Ozumba, Temamatla, Tenango del Aire, Tepetlixpa, Tlalmanalco y Valle de Chalco Solidaridad.

El incremento de las $PM_{2.5}$ fue ocasionado por la pirotecnia y fogatas, así como por condiciones meteorológicas adversas que afectaron la dispersión de las partículas. Durante las horas que se registraron los máximos de $PM_{2.5}$ (05:00 a 11:00 h), se presentaron vientos muy débiles en toda la ZMCM, lo cual favoreció la acumulación de partículas (**Figura 6.10**). Las regiones más afectadas fueron el sureste y noreste, ya que las estaciones ubicadas en estas zonas, como SAC, Nezahualcóyotl (NEZ) y Montecillos (MON), presentaron valores superiores a 50 µg/m³ (promedio móvil de 24 h).

A las 12:00 h, los niveles descendieron para los indicadores del máximo horario y del NowCast, con 225 µg/m³ y 228 µg/m³, respectivamente. Por el contrario, el promedio móvil de 24 h continuó en incremento y registró un máximo de 106 µg/m³, esto es debido a que su cálculo utiliza los datos horarios de 23 horas anteriores, por lo que todavía considera los valores más altos de la madrugada. En la siguiente hora (13:00 h), el promedio móvil de 24 h obtuvo un máximo de 107 µg/m³ en la estación SAC, mientras que el valor más alto del indicador horario fue de 102 µg/m³ y el NowCast registró 165 µg/m³. El máximo del día para el promedio móvil de 24 h se presentó a las 15:00 h con 109 µg/m³ en SAC, para este momento el máximo horario fue 35 µg/m³ y el del NowCast fue 70 µg/m³.

En el promedio móvil de 24 h, persistieron los valores superiores a 100 µg/m³ durante toda la tarde y noche del 25 de diciembre, por lo que la CAMe mantuvo la contingencia hasta el siguiente día. A la 01:00 h del 26 de diciembre, todavía se superaba el umbral de Fase I en el promedio móvil de 24 h con un máximo de 104 µg/m³ en SAC, mientras que el valor horario y el NowCast registraron 30 y 32 µg/m³, respectivamente. Hasta las 03:00 h, los valores del promedio móvil de 24 h fueron menores al umbral de contingencia con un máximo de 93.4 µg/m³. Después de esta hora, la concentración continuó en descenso, por lo que la CAMe suspendió la Fase I regional por $PM_{2.5}$ a las 08:00 h del 26 de diciembre. A esta hora, el promedio móvil de 24 h registró un máximo de 63 µg/m³, mientras que el indicador horario fue de 46 µg/m³ y el NowCast obtuvo 45 µg/m³.

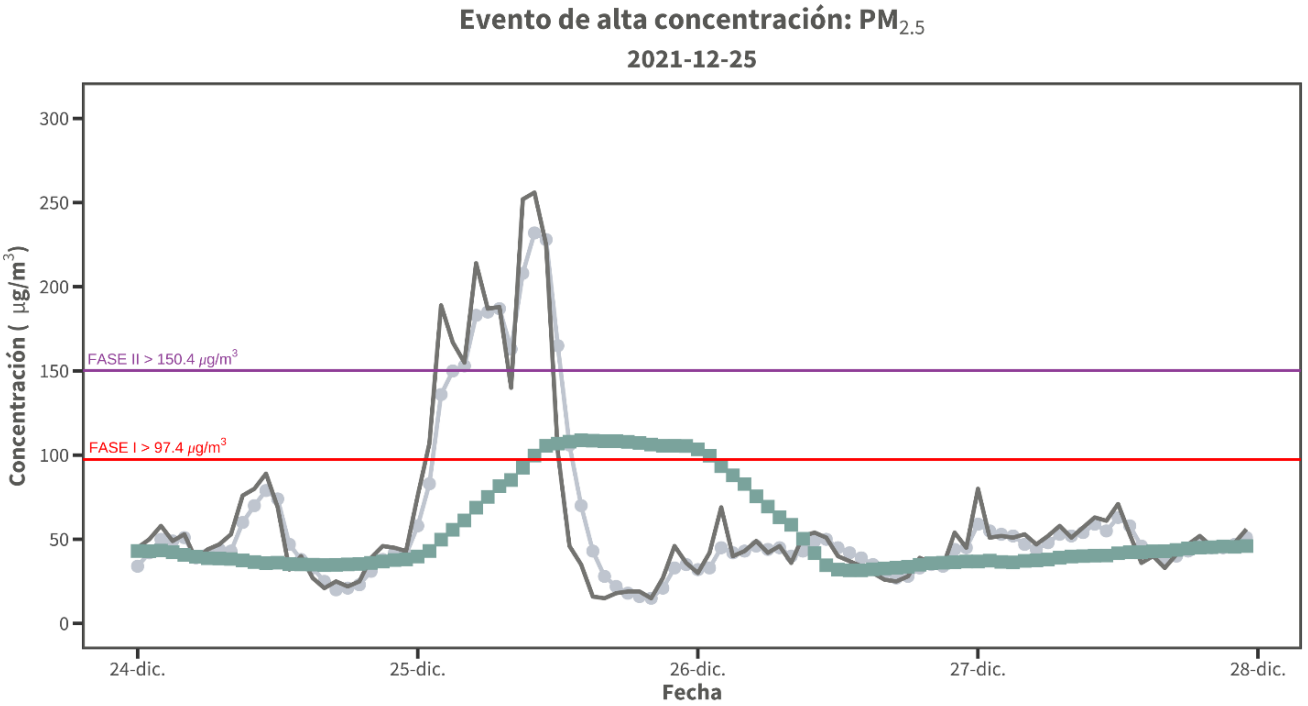


Figura 6.9. Concentración de $PM_{2.5}$ del 24 al 27 de diciembre. La línea gris oscuro es el máximo horario, mientras que la línea gris claro es el valor del NowCast. Los cuadros verdes corresponden al máximo del promedio móvil de 24 h, este indicador activa la Fase I y II. Las líneas horizontales son las Fases I y II del programa de contingencia.

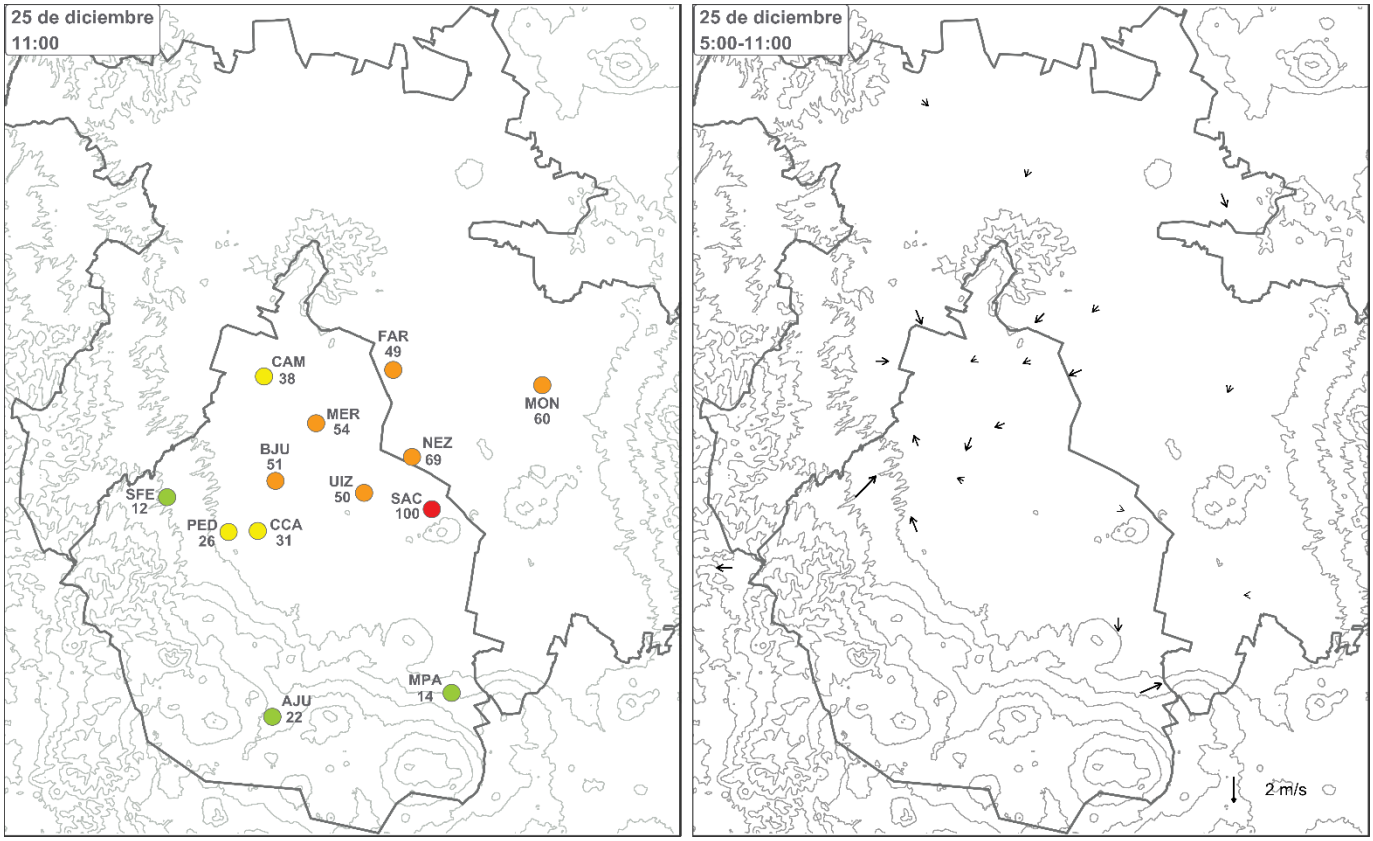


Figura 6.10. Máximo del promedio móvil de 24 horas para $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) con su categoría (color) del Índice AIRE y SALUD a las 11:00 h (izquierda). Vector promedio del viento del 25 de diciembre entre las 05:00 y 11:00 h (derecha).

CAPÍTULO 7

Depósito Atmosférico

DEPÓSITO ATMOSFÉRICO

¿CÓMO SE FORMA LA LLUVIA ÁCIDA?

La atmósfera casi siempre pasa desapercibida para nosotros, pero la vida como la conocemos no sería posible sin ella. La región atmosférica con la que interactuamos es la tropósfera, inicia a nivel de suelo y alcanza hasta 10 km de altura, esta capa contiene casi el 75 % de la masa total de los gases que constituyen la atmósfera. La tropósfera es la capa más activa de todas, ya que en ella se desarrollan todos los fenómenos climatológicos que percibimos, como tornados, huracanes, nubes y lluvias. Adicionalmente, casi todo el vapor de agua de la atmósfera está concentrado en la tropósfera y su aire está en constante movimiento (Domínguez, 2004).

Por otro lado, en la atmósfera también ocurre una reacción entre el agua, oxígeno y los gases contaminantes provenientes de actividades antropogénicas, principalmente por el uso de combustibles fósiles (Garcés Giraldo & Hernández Ángel, 2004). Debido a esta reacción de contaminantes con el agua, el pH de la lluvia se altera y puede disminuir considerablemente, lo que la convierte en lluvia ácida. Es importante mencionar que, normalmente, la lluvia tiene un pH ligeramente ácido con un valor de 5.6, debido al CO_2 en la atmósfera; sin embargo, en la presencia de otros contaminantes, se forman ácidos más fuertes (Domínguez, 2004) [1]. Se considera lluvia ácida cuando el pH es menor a 5.6 y se presenta cuando los gases emitidos por algunos procesos (p. ej. quema de combustibles fósiles), como el dióxido de azufre (SO_2) y los óxidos de nitrógeno (NO_X), estos reaccionan con el agua, el oxígeno y otros químicos en la atmósfera para formar ácido sulfúrico (H_2SO_4) y nítrico (HNO_3), respectivamente (Sosa Echeverría et al., 2023) [2]. De acuerdo con el inventario de emisiones 2020 de la CDMX (SEDEMA, 2023), el 84 % de los NO_x son generados por fuentes móviles, con una mayor contribución del transporte particular y público de baja y mediana capacidad, como taxis, vagonetas y microbuses. En cuanto a las emisiones de SO_2, el 39 % corresponden a las industrias, seguido por las fuentes de área con el 32 % [3].

La lluvia ácida tiene efectos negativos en la salud humana, la calidad del aire y del agua, así como en la biodiversidad (Garcés Giraldo & Hernández Ángel, 2004). En estudios realizados por Rodríguez-Sánchez (2020) con las especies de árboles más abundantes de la CDMX, *Liquidambar styraciflua* L. y *Fraxinus uhdei Wenz*., se determinó que el pH ácido de la lluvia reduce el contenido de clorofila en ambas especies (Rodríguez-Sánchez, et al. 2020), lo que conlleva a daño fisiológico y posteriormente un daño físico en las hojas, por lo que, con el paso del tiempo, la lluvia ácida genera un impacto negativo en la vegetación [4].

Además, la lluvia ácida afecta la infraestructura de la ciudad, ya que degrada los materiales de construcción que están en contacto continuo con ella (Castillo-Miranda & Rodríguez-Gómez, 2022) [5]. En el largo plazo, la lluvia ácida también tiene impacto negativo en los cuerpos de agua, como se ha reportado en diversos estudios a nivel mundial, en los que se ha demostrado que, aunque la lluvia ácida puede ser neutralizada por los compuestos básicos contenidos en ríos y lagos; con el tiempo, se agotan los compuestos neutralizantes, por lo que el efecto amortiguador se pierde y en consecuencia, el pH disminuye (Chen et al., 2013; Zhang, L. et al. 2024) [6] (**Figura 7.1**).

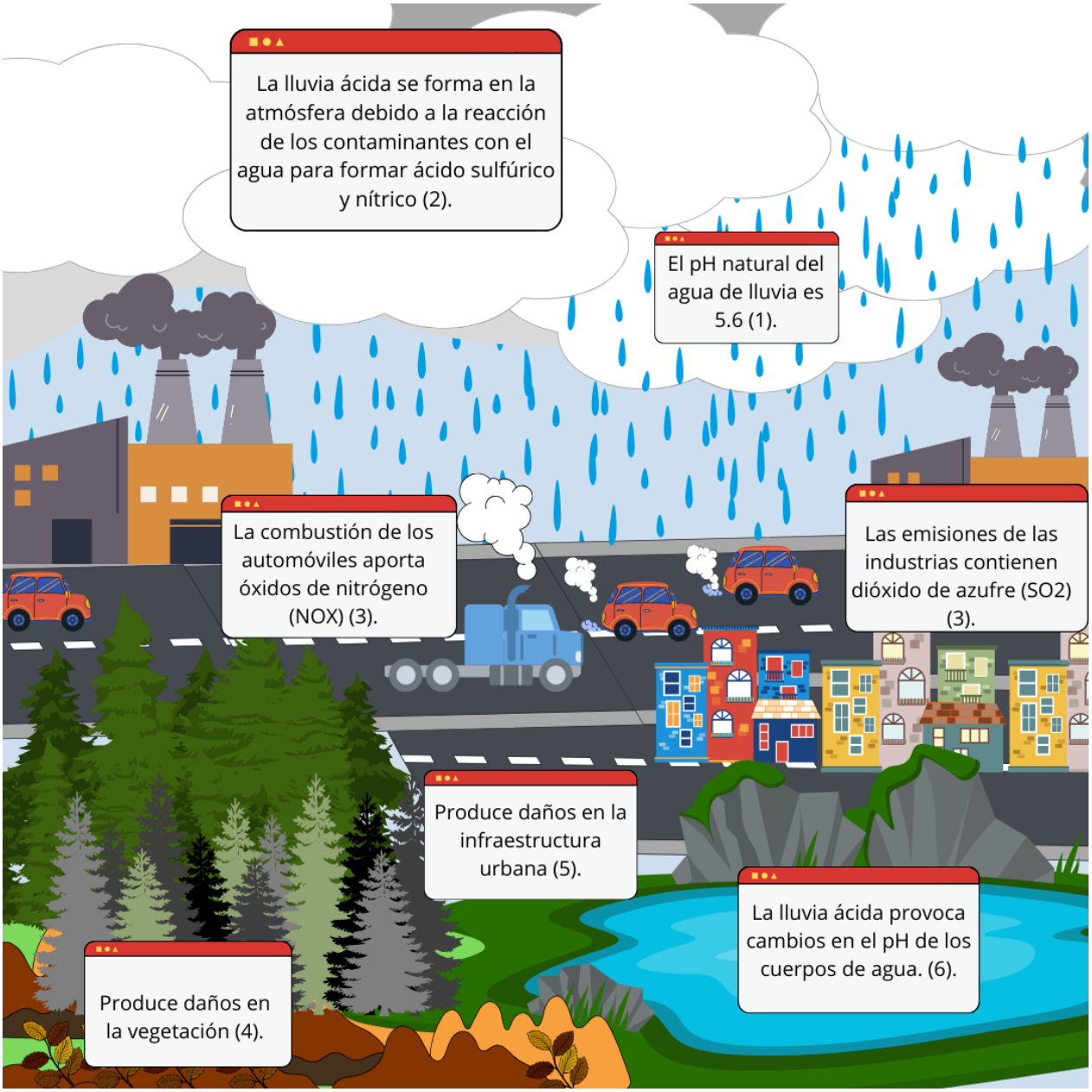


Figura 7.1. Fuentes y efectos de la lluvia ácida, en paréntesis se encuentra la numeración que corresponde a una explicación más detallada de cada uno de los recuadros en el texto de arriba. Los párrafos que corresponden a cada uno de los números se encuentran señalados por superíndices. *Elaboración propia*.

*La numeración dentro de los cuadros corresponde con las referencias bibliográficas de las páginas anteriores

Campaña 2021 de la Red de Depósito Atmosférico (REDDA)

La red del SIMAT responsable de la recolección y análisis del depósito atmosférico es la REDDA, que está conformada por 16 sitios de monitoreo, que tienen equipos semiautomáticos para la recolección de depósito húmedo (lluvia, nieve o granizo). Esta recolección se realiza durante 7 días, posteriormente, las muestras se llevan al laboratorio para realizar análisis fisicoquímico, así como para determinar la composición iónica y acidez (SEDEMA, 2023).

La campaña de REDDA se realiza en la temporada de lluvia (mayo a octubre), y que de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), la CDMX registró un acumulado de **615.3 mm** (CONAGUA, 2021). En la campaña 2021, únicamente funcionaron 9 de sus 16 estaciones (**Figura 7.2**), debido a que continuaron las restricciones por la pandemia de COVID-19. Los 9 sitios fueron: Tlalnepantla (TLA), Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA), Museo de la Ciudad de México (MCM), Nezahualcóyotl (NEZ), Montecillo (MON), Exconvento Desierto de los Leones (EDL), Ecoguardas Ajusco (EAJ), CORENA (COR) y Ajusco (AJU). La suficiencia[1] de las estaciones fue mayor al 75% excepto en MON (65.4 %), COR (73.1 %) y LAA (23.1 %).

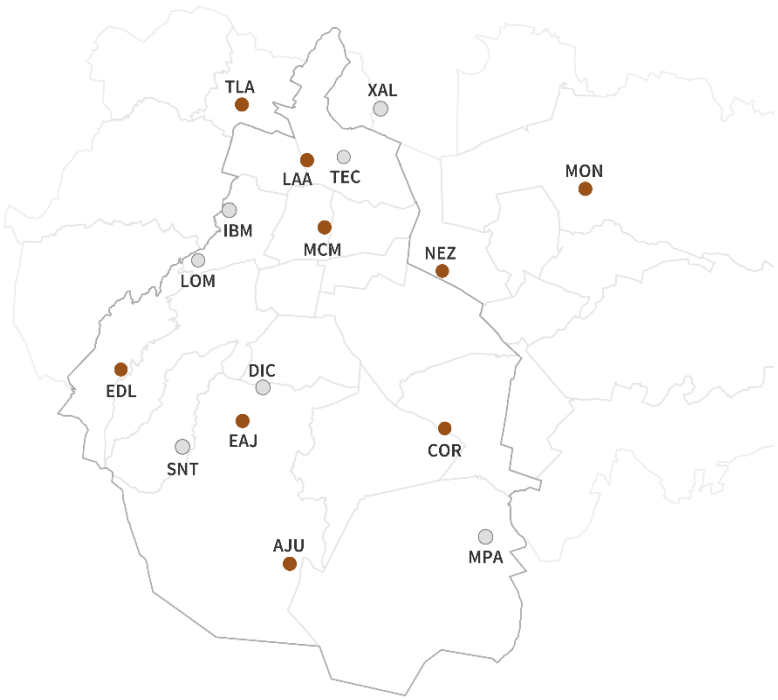


Figura 7.2. Distribución espacial de las estaciones de REDDA. Los sitios en color gris estuvieron fuera de operación durante 2021 debido a la pandemia.

[1]La suficiencia es el porcentaje de datos medidos por estación con respecto al número de datos esperado en un periodo determinado. En la REDDA se calcula con el número de muestreos semanales esperado como el 100% (SEDEMA, 2023).

Precipitación y pH

La precipitación pluvial en la CDMX presenta una variabilidad espacial que está influenciada principalmente por factores geográficos, por ejemplo, altitud, latitud y orografía; así como por factores climáticos: temperatura, circulación atmosférica y humedad relativa (Díaz-Padilla et al., 2011).

La zona suroeste de la CDMX normalmente registra los valores más altos de precipitación acumulada, es decir, donde están ubicadas las estaciones AJU y EDL. En un estudio realizado por José Luis Bravo et al. (2014), se analizaron datos de precipitación de 23 estaciones climatológicas ubicadas en el Distrito Federal para el periodo 1954-19888. Se determinó que la lluvia en la Ciudad de México presenta una variabilidad espacial y temporal significativa, influenciada por la urbanización y la orografía. Además, se encontró que la parte suroeste de la ciudad, afectada por el efecto de montaña, registró los máximos de precipitación acumulada, mientras que, en la parte noreste, se observaron los mínimos. Este patrón también se observó con la distribución espacial de la precipitación acumulada obtenida para la campaña 2021 de la REDDA, de mayo a octubre (Figura 7.3).

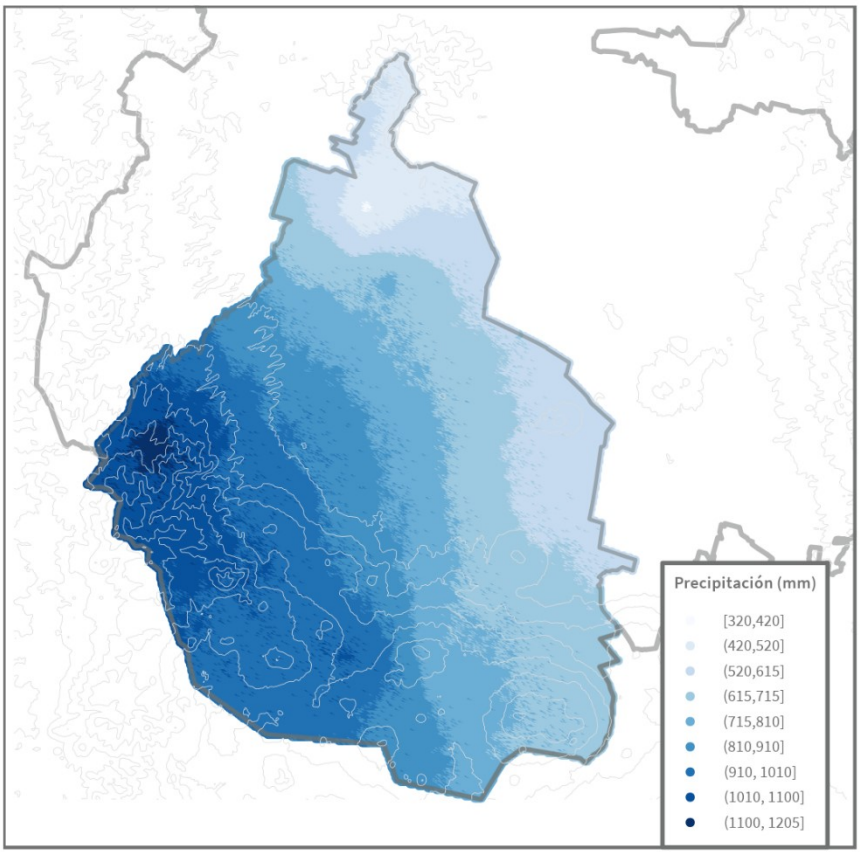


Figura 7.3. Distribución espacial de la lluvia en la Ciudad de México durante 2021. Interpolación por el método de Kriging de los acumulados de precipitación por estación.

En el 2021, la precipitación pluvial registrada en la campaña REDDA tuvo un promedio de 785 mm. El mes con el máximo fue agosto (1,782 mm), mientras que octubre presentó menos precipitación (328 mm). A nivel estación, los valores mínimos de lluvia acumulada se registraron en MON (353 mm) y COR (514 mm), estaciones ubicadas en la zona este y noreste de la CDMX, respectivamente (Figura 7.4). Los valores máximos de lluvia acumulada se registraron en los sitios EDL (1,418 mm), AJU (1,186 mm) y EAJ (1,067 mm), los cuales son de tipo rural y están ubicados en la zona montañosa al suroeste de la CDMX. Es importante mencionar que se excluyó la estación LAA debido a que su equipo presentó problemas y los muestreos se detuvieron después de julio, por lo que la suficiencia de datos fue menor al 50%.

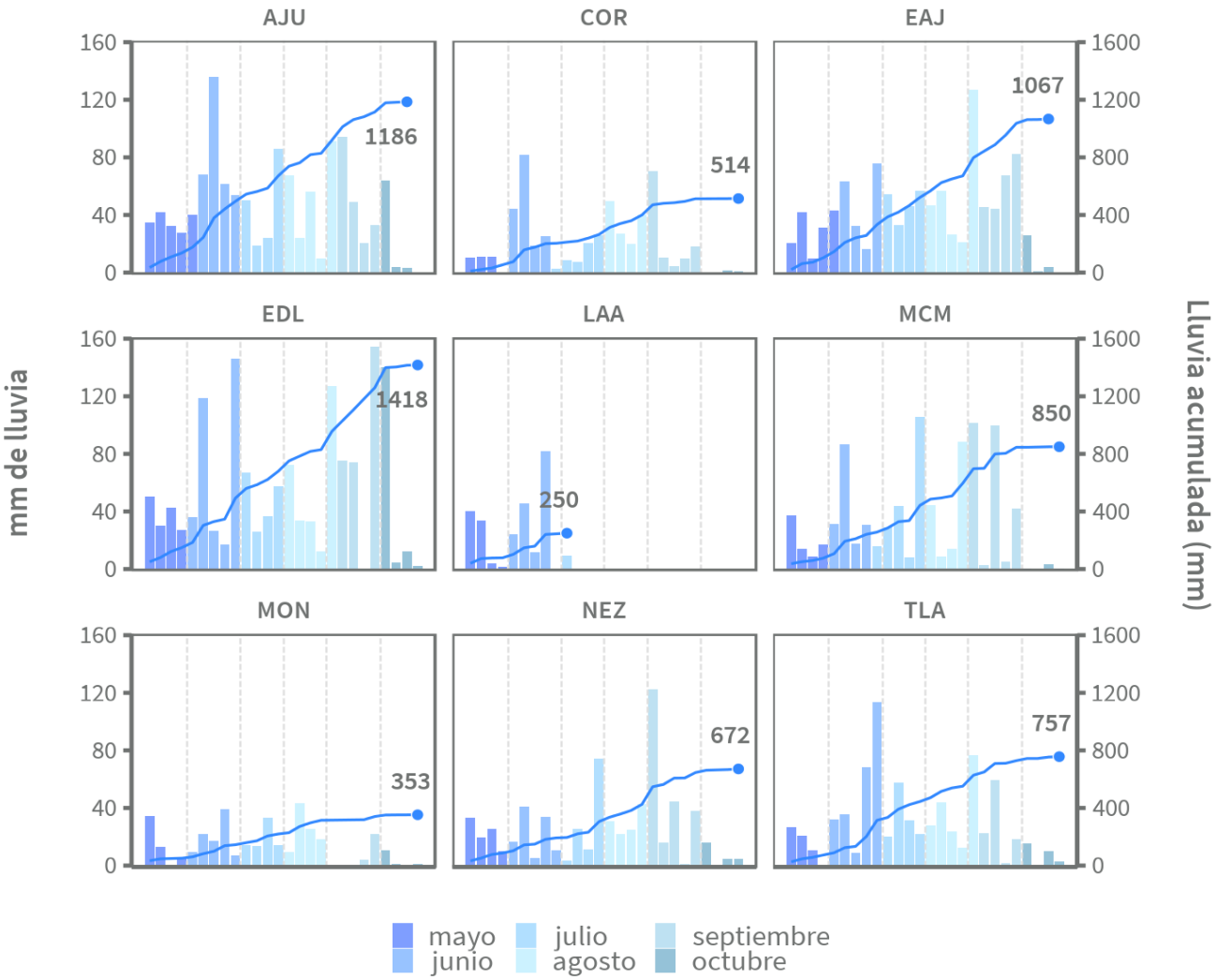


Figura 7.4. Precipitación acumulada semanal (cada semana es representada por una barra) desglosada mensualmente (división mensual por colores y línea punteada en gris claro). La línea azul oscuro representa la precipitación acumulada mensual y total del periodo mayo – octubre 2021 por estación. Expresado en mm de lluvia.

En el análisis temporal de las muestras de lluvia se determinó que los meses con mayor proporción de eventos ácidos (pH < 5.6) fueron agosto (22.9 %), seguido de junio (15.1 %), julio (11.9 %) y septiembre (7.1 %). En mayo y octubre no se registró ningún evento ácido. Adicionalmente, se observó que durante mayo, agosto y octubre se presentaron muestras con pH básico, dentro del rango 7.3 a 8.1 (Figura 7.5).

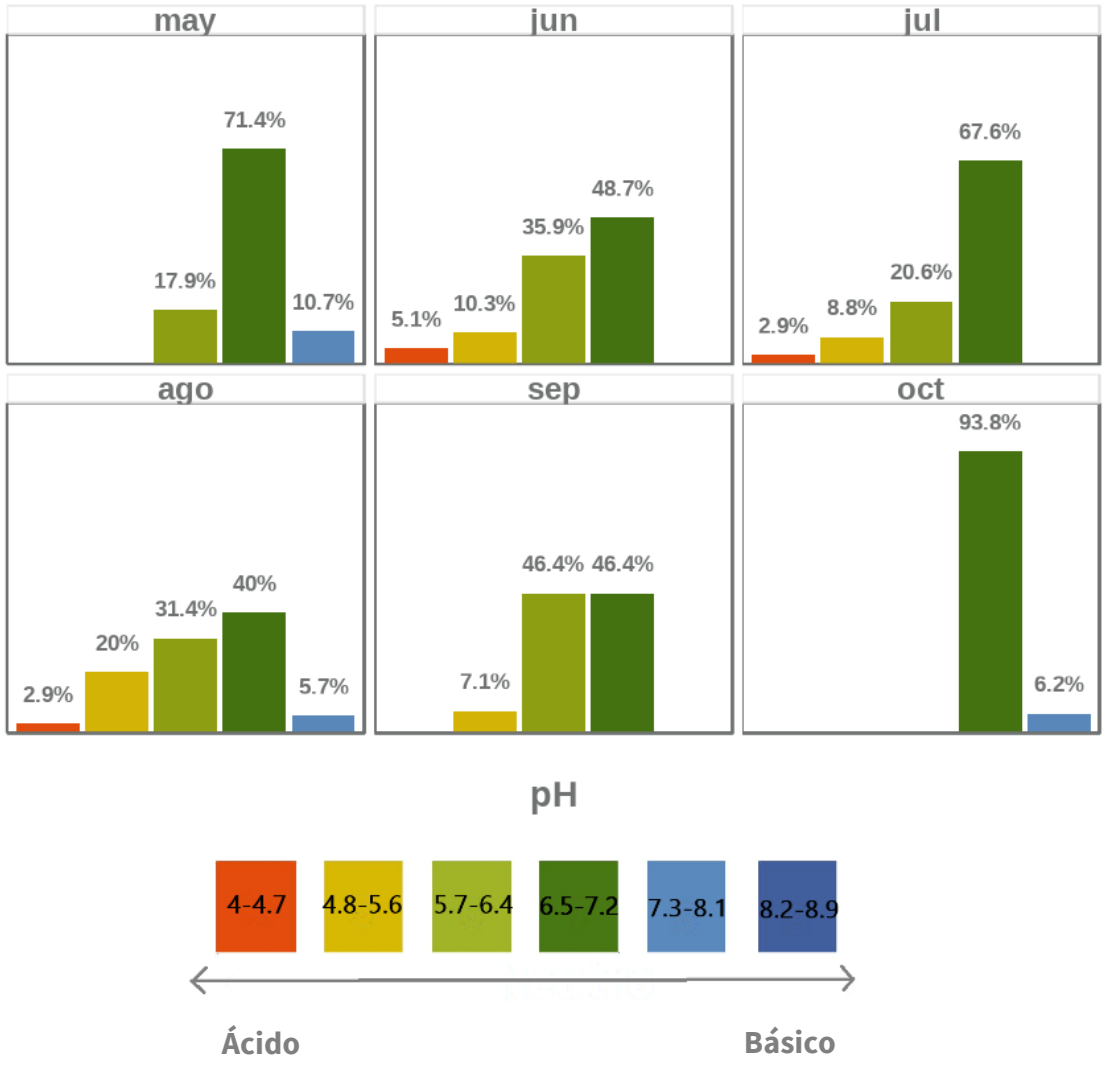


Figura 7.5. Distribución mensual del pH de las muestras de la campaña 2021.

En el análisis del pH ácido, se determinó que la muestra más ácida se registró en AJU (4.6) en julio y la muestra menos ácida en MON (7.44) durante abril. Las estaciones con mayor cantidad de eventos ácidos (pH< 5.6) fueron AJU con el 36 % de las muestras, para EAJ fue el 13 %, COR con 10.5 %, TLA registró el 9.5 % y en EDL fue del 8.3 %; estos sitios están ubicados en el sur de la ZMCM, excepto TLA, que está el noroeste (Tabla 7.1). Las estaciones sin registro de eventos ácidos fueron MCM, MON y NEZ, situadas al centro y noreste de la ZMCM. Estos resultados sugieren el sur de la ZMCM es más vulnerable a la lluvia ácida, lo cual tiene implicaciones ambientales importantes, debido a que se localizan las Áreas Naturales Protegidas (ANP) de la CDMX.

Tabla 7.1. Resumen de las mediciones de pH durante la campaña 2021 de la REDDA.

Estación	pH mínimo	Conteo de muestras ácidas (pH < 5.6)	Total de muestras en la campaña	Porcentaje de eventos ácidos
AJU	4.6	9	25	36.0 %
COR	4.98	2	19	10.5 %
EAJ	4.75	3	23	13.0 %
EDL	5.14	2	24	8.3 %
MCM	6.03	0	23	0 %
MON	6.18	0	17	0 %
NEZ	5.95	0	22	0 %
TLA	4.68	2	21	9.5%

Se realizó una interpolación con IDW del pH ponderado anual por estación, durante el periodo de 2010 a 2021 para analizar el cambio del pH en el tiempo. Se encontró que el pH de la lluvia varía de 4.3 a 6.7 y es más ácido en las regiones oeste – suroeste de la ZMCM, mientras que es más alcalino en el centro, este y sureste, lo cual fue más notable en los años 2010 – 2011 y 2016 – 2021. Durante el periodo 2012 – 2015, se observó una tendencia de pH ácido ya que la mayoría de los mapas de interpolación están cubiertos en tonalidades naranjas a amarillas, esto es debido a que el pH ponderado obtuvo valores menores a 5.6 en dicho periodo y en la mayoría de las estaciones (Figura 7.6 y 7.7). Aunque la tendencia temporal no es totalmente clara, se observó que las zonas con mayor afectación sí están bien localizadas y tienen una explicación meteorológica, ya que los vientos dominantes en la ZMCM tienen dirección de norte hacia el sur, por lo que se trasladan los contaminantes a esta región. El impacto de la lluvia ácida es considerable debido a que esta es una zona boscosa y agrícola, así como de recarga de acuíferos.

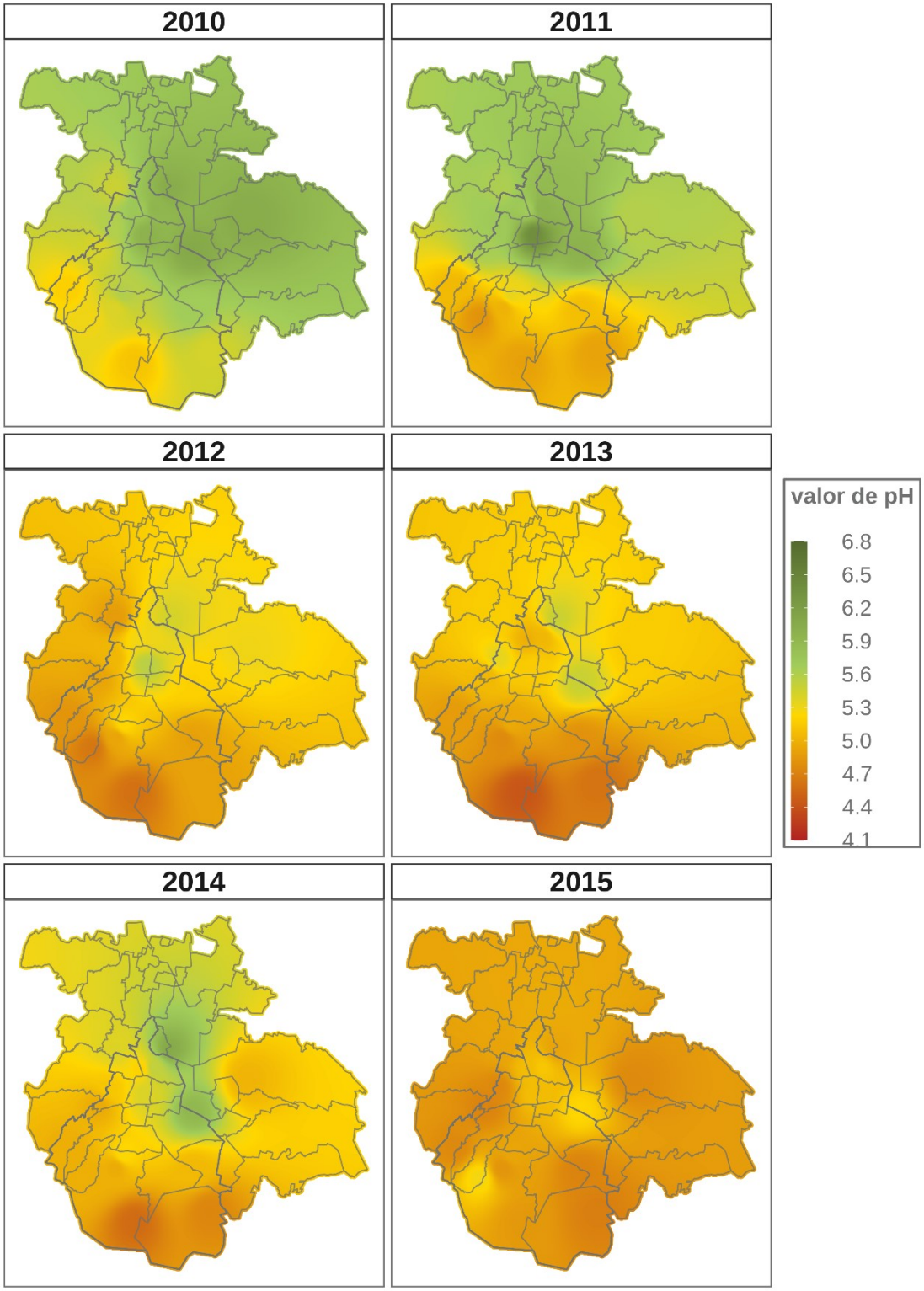


Figura 7.6. Distribución espacial de la lluvia ácida en la ZMCM 2010 – 2015, los tonos rojos, anaranjado y amarillos indican la presencia de lluvia ácida (pH menor a 5.6).

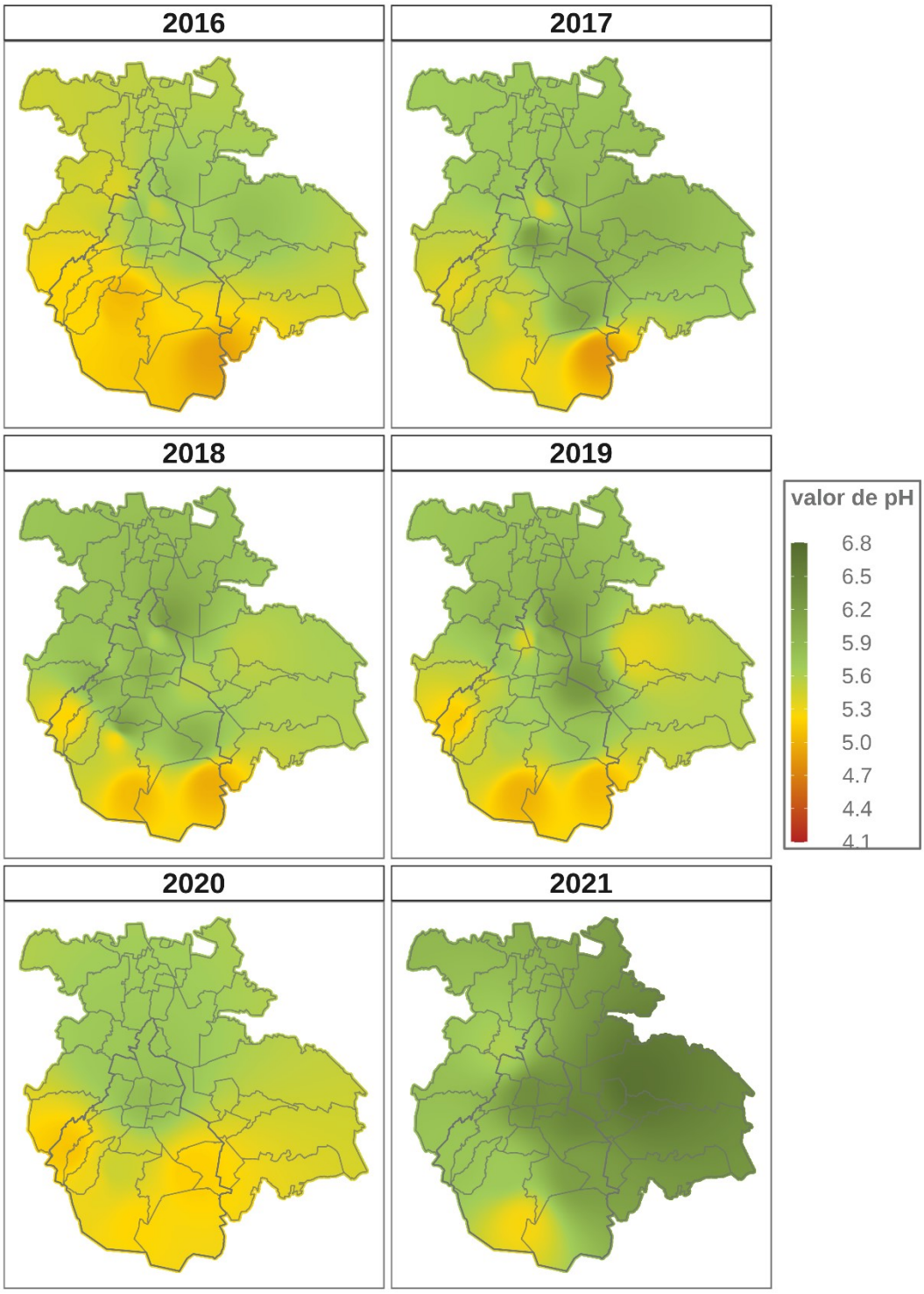


Figura 7.7. Distribución espacial de la lluvia ácida en la ZMCM 2016 – 2021, los tonos rojos, anaranjado y amarillos indican la presencia de lluvia ácida (pH menor a 5.6).

Composición iónica y depósito total

En las muestras de lluvia de la ZMCM, las especies iónicas más abundantes, según los promedios calculados en micro equivalentes por litro (µeq/L), fueron el amonio (NH_4^+) con una contribución del 30.9 %, el calcio (Ca^{2+}) tuvo 27.2 %, el sulfato (SO_4^{2-}) registró el 18.7 % y el nitrato (NO_3^-) con 14.6 % (**Figura 7.7**). En menor proporción se encuentran los iones cloro (Cl^-) que representa el 3.6 %, magnesio (Mg^{2+}) con 1.6 %, el sodio (Na^+) y potasio (K^+) obtuvieron el 1.4% cada uno, mientras que el hidrógeno (H^+) registró el 0.6%; la suma de estos iones representó sólo el 8.6% del total.

En el análisis del porcentaje de iones por estación, se observaron los siguientes resultados en las especies más abundantes:

- El NH_4^+ representó más del 35 % de los iones en los sitios COR y MON, al este de la ZMCM, mientras que en EDL y MCM tuvo una contribución del 28 %.
- En las estaciones NEZ y MCM, ubicadas al noreste y centro, presentaron una mayor proporción de Ca^{2+} con más del 30 % del total. Mientras que en los sitios COR y AJU, en el sureste y suroeste, registraron menos del 23 % de Ca^{2+}.
- El SO_4^{2-} tuvo su mayor aporte en AJU (22.4 %) y la estación con menor concentración de este ion fue NEZ con el 16 %.

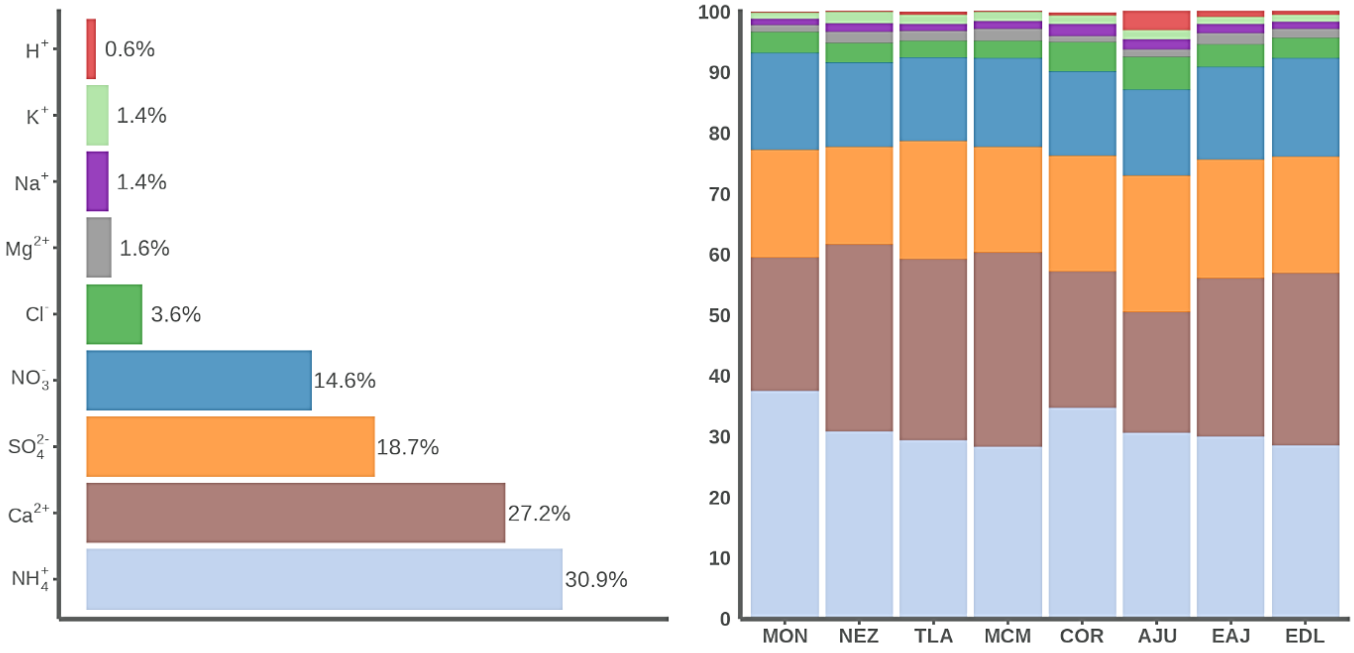


Figura 7.7. Contribución total (%) de los iones (izquierda) y proporción de iones por estación (derecha). Los porcentajes fueron obtenidos a partir del cálculo de concentración en µEq/L.

Durante la campaña 2021, el promedio del depósito total para el SO_4^{2-} fue de 13.97 kg/ha, NO_3^- registró 13.71 kg/ha, el NH_4^+ obtuvo 8.88 kg/ha, para Ca^{2+} fue de 7.23 kg/ha, Cl^- registró 2.07 kg/ha, el K^+ tuvo un promedio de 0.8 kg/ha, mientras que el Na^+ y Mg^{2+} registraron 0.53 y 0.31 kg/ha, respectivamente. El máximo del depósito de SO_4^{2-} se presentó en EDL con 21.1 kg/ha y el mínimo fue de 5 kg/ha en la estación LAA. Para el NO_3^-, el máximo se registró en EDL con 22.7 kg/ha y su mínimo se presentó en LAA con 5.3 kg/ha. El máximo del ion NH_4^+, se registró en EDL con 12.3 kg/ha, mientras que su mínimo fue 4.1 kg/ha en LAA. Para el resto de los iones, los valores máximos y mínimos de depósito total se pueden apreciar en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2. Depósito total de cada especie iónica durante la campaña REDDA 2021.

Entidad	Estación	Clave	Depósito total (kg/ha) ANIONES			Depósito total (kg/ha) CATIONES					
			NO_3^-	SO_4^{-2}	Cl^-	NH_4^+	Ca^{2+}	K^+	H^+	Mg^{2+}	Na^+
CDMX	Ajusco	AJU	15.20	19.20	3.60	10.10	6.00	1.20	0.066	0.30	0.80
	Corena	COR	9.70	10.00	1.70	7.00	4.40	0.80	0.004	0.10	0.30
	Ecoguardas Ajusco	EAJ	18.30	18.40	2.70	11.40	9.40	1.00	0.022	0.40	0.60
	Ex Convento Desierto Leones	EDL	22.70	21.10	3.00	12.30	11.40	1.10	0.024	0.60	0.60
	Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	5.30	5.00	0.50	4.10	2.90	0.30	0.001	0.10	0.23
	Museo de la Ciudad de México	MCM	16.20	15.70	2.30	10.90	9.60	0.90	0.004	0.30	0.60
EDOMEX	Montecillo	MON	7.20	6.00	0.90	4.80	3.30	0.30	0.001	0.10	0.20
	Nezahualcóyotl Sur	NEZ	12.70	11.50	1.80	9.00	7.20	0.80	0.003	0.30	0.80
	Tlalnepantla	TLA	16.20	18.90	2.20	10.40	10.90	0.80	0.020	0.60	0.60
Promedio del depósito total acumulado			**13.71**	**13.97**	**2.07**	**8.88**	**7.23**	**0.80**	**0.016**	**0.31**	**0.53**

Referencias

REFERENCIAS

American Meteorological Society, (AMS). (2020). *Glossary of Meteorology*. https://glossary.ametsoc.org/wiki/Welcomeknow/

Arias-Pérez, R.D., Taborda N.A., Gómez D.M., Narváez, J.F., Porras, J. & Hernández, J.C. (2020). *Inflammatory effects of particulate matter air pollution*. Environ Sci. Pollut. Res. Int., 27(34), 42390-42404. https://doi.org/10.1007/s11356-020-10574-w

Bravo, J. L., Azpra, E., Zarraluqui, V., & Gay, C. (2014). *Some variations of the rainfall in Mexico City from 1954 to 1988 and their statistical significance*. Atmósfera, 27(4), 367-376. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-62362014000400003

Bravo-Cabrera, J. L., Azpra-Romero, E., Zarraluqui-Such, V. , & Gay-García, C. (2017). *Effects of El Niño in Mexico during rainy and dry seasons: an extended treatment.* Atmósfera, 30(3), 221-232. https://doi.org/10.20937/atm.2017.30.03.03

California Air Resources Board, (CARB). (2024a). *Air Quality Standards*. Arb.ca.gov. https://ww2.arb.ca.gov/es/resources/background-air-quality-standards.

California Air Resources Board, (CARB). (2024b). *Sulphur dioxide & Health*. Arb.ca.gov. https://ww2.arb.ca.gov/resources/sulfur-dioxide-and-health

California Air Resources Board, (CARB). (2024c). *Carbon Monoxide & Health*. Arb.ca.gov. https://ww2.arb.ca.gov/news/carbon-monoxide-health-advisory

Castillo-Miranda, J. O., y Rodríguez-Gómez, F. J. (2022). *Mapping of the cost of atmospheric corrosion of zinc and galvanised steel due to the effect of atmospheric pollution in the Mexico City Metropolitan Area*. Corrosion Engineering Science and Technology, 57(5), 408-419. https://doi.org/10.1080/1478422X.2022.2074115

Chen, L., Liu, R.M., Huang, Q. Chen, Y.X., Gao, S.H., Sun, C.C. & Shen, Z.Y. (2013). *Integrated assessment of nonpoint source pollution of a drinking water reservoir in a typical acid rain region*. Int. J. Environ. Sci. Technol. 10, 651–664. https://doi.org/10.1007/s13762-013-0242-z

Comisión Ambiental de la Megalópolis, (CAMe). (2021a). *Se activan medidas por altas concentraciones de ozono en la ZMVM. Comunicado de prensa del 8 de junio del 2021.* https://www.gob.mx/comisionambiental/prensa/se-activan-medidas-por-altas-concentraciones-de-ozono-en-la-zmvm?idiom=es

Comisión Ambiental de la Megalópolis, (CAMe). (2021b). *Se activan medidas por altas concentraciones de ozono en la Zona Metropolitana del Valle de México. Comunicado 21 de abril 2021 a las 18:00 hrs*. https://www.gob.mx/comisionambiental/prensa/se-activan-medidas-por-altas-concentraciones-de-ozono-en-la-zona-metropolitana-del-valle-de-mexico-291784?idiom=es

Comisión Ambiental de la Megalópolis, (CAMe). (2021c). *Se activan medidas por altas concentraciones de ozono en la Zona Metropolitana del Valle de México. Comunicado de Prensa 26 de abril del 2021*. https://www.gob.mx/comisionambiental/prensa/se-activan-medidas-por-altas-concentraciones-de-ozono-en-la-zona-metropolitana-del-valle-de-mexico-291733?idiom=es

Comisión Ambiental de la Megalópolis, (CAMe). (2021d). *Se activa fase preventiva regional por partículas PM2.5 en la zona sureste del Valle de México. Comunicado de prensa del 25 de diciembre del 2021.* https://www.gob.mx/comisionambiental/prensa/se-activa-fase-preventiva-regional-por-particulas-pm2-5-en-la-zona-sureste-del-valle-de-mexico?idiom=es

Comisión Nacional del Agua, (CONAGUA). (2021). *Precipitación (mm) por Entidad Federativa y Nacional 2021.* Servicio Meteorológico Nacional. Gobierno de México. https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Pron%C3%B3stico%20clim%C3%A1tico/Temperatura%20y%20Lluvia/PREC/2021.pdf

de Foy, B., Caetano, E., Magaña, V., Zitácuaro, A., Cárdenas, B., Retama, A., Ramos, R., Molina, L. T., & Molina, M. J. (2005). *Mexico City basin wind circulation during the MCMA-2003 field campaign*. Atmos. Chem. Phys., 5, 2267-2288. https://doi.org/10.5194/acp-5-2267-2005

Díaz-Padilla, G., Sánchez-Cohen, I., Quiroz, R., Garatuza-Payán, J., Watts-Thorp, C., Cruz-Medina, I. R., & Guajardo-Panes, R. A. (2011). *Variación espacio-temporal de la precipitación pluvial en México: Una aproximación a la evaluación de impactos*. Tecnol. cienc. agua, 2(4), 51-64.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222011000400004&lng=es&nrm=iso

Domínguez, H. (2004). *Nuestra atmosfera: Como comprender los cambios climáticos*. 1ª. edición. Ed. Lectorum.

Fioletov, V., Kerr, J.B. & Fergusson, A. (2010). *The UV index: definition, distribution and factors affecting it*. Can J Public Health. Jul-Aug;101(4):I5-9. PMID: 21033538; PMCID: PMC6974160.
https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21033538/

Garcés Giraldo, L. F., & Hernández Ángel, M. L. (2004). *La lluvia ácida: Un fenómeno fisicoquímico de ocurrencia local*. Revista Lasallista de Investigación, 1(2), 67-72.
https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69510211

García, M., Ulloa, H., Ramírez, H., Fuentes, M., Arias, S. & Espinosa, M. (2014). *Comportamiento de los vientos dominantes y su influencia en la contaminación atmosférica en la zona metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México.* Revista Iberoamericana de Ciencias, 1(2), 97 - 116.
http://www.reibci.org/publicados/2014/julio/2200120.pdf

Han, B., Wang, Y., Zhang, R., Yang, W., Ma., Z., Geng, W., & Bai, Z. (2019). *Comparative statistical models for estimating potential roles of relative humidity and temperature on the concentrations of secondary inorganic aerosol: Statistical insights on air pollution episodes at Beijing during January 2013.* Atmospheric Environment, 212, 11 - 21.
https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.05.025.

Hanley, D.E., Bourassa, M.A., O'Brien, S.R. & Sapade, E.R. (2003*). A Quantitative Evaluation of ENSO Indices*. J. Climate, 16, 1249 – 1258.
https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)16<1249:AQEOEI>2.0.CO;2

Hartmann, D. L. (2015). *Global physical climatology.* 2da. edición. Elsevier Science & Technology.

Huangfu, P. & Atkinson, R. (2020). *Long-term exposure to NO_2 and O_3 and all cause and respiratory mortality: A systematic review and meta-analysis.* Environment International, 144, 105998. https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105998.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, (IDEAM). (2023). *Radiación Solar.* Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Colombia. http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar-ultravioleta

Jáuregui, E. (1971). *Variaciones de largo periodo de los tipos de tiempo de superficie en México.* Investigaciones geográficas, *(4), 627.* *https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46111995000200001*

Lazaridis, M. (2011). *First Principles of Meteorology*. In: First Principles of Meteorology and Air Pollution. Environmental Pollution, vol 19. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0162-5_2

Levy, R.J. (2015). *Carbon monoxide pollution and neurodevelopment: A public health concern.* Neurotoxicol Teratol., 49 (5), 31-40. https://doi.org/10.1016/j.ntt.2015.03.001

Liu, Y., Zhou, Y. & Lu, J. (2020). *Exploring the relationship between air pollution and meteorological conditions in China under environmental governance*. Sci. Rep. 10, 14518. https://doi.org/10.1038/s41598-020-71338-7

Márquez M, E. (1975). *Red Computarizada Automática de Monitoreo del Aire del Valle de México (RECAMA).* Salud Pública de México, Época V, Volumen XVII, 5, 699 – 706. https://saludpublica.mx/index.php/spm/article/view/1375

Martín Cullell, J. (2021a). *El apagón expone la dependencia energética de México y su déficit de infraestructura.* El País. Publicado el 17 de febrero del 2021. https://elpais.com/mexico/2021-02-17/el-apagon-expone-la-dependencia-energetica-de-mexico-y-su-deficit-de-infraestructura.html

Martín Cullell, J. (2021b). *Texas ahoga a México con el cierre de la exportación de gas natural a causa del temporal.* El País. Publicado el 18 de febrero del 2021. https://elpais.com/mexico/2021-02-18/texas-ahoga-a-mexico-con-el-cierre-de-la-exportacion-de-gas-natural-a-causa-del-temporal.html

National Oceanic and Atmospheric Administration. National. Centers for Environmental Information, (NOAA). (2022). *Annual 2022 Global Climate Report*. National Oceanic and Atmospheric Administration.
https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202113.

Organización Meteorológica Mundial, (OMM). (2017). *Directrices de la Organización Meteorológica Mundial sobre el cálculo de las normales climáticas.*
https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4167

Organización Mundial de la Salud, (OMS). (2003). *Índice UV Solar Mundial, Guía Práctica*, WHO/SDE/OEH/02.2.
https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/42633/9243590073.pdf?sequence=1

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. Resumen de evaluación de riesgos.
https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Organización Mundial de la Salud, (OMS). (2021). *Contaminación atmosférica*.
https://www.who.int/es/health-topics/air-pollution#tab=tab_1

Organización de las Naciones Unidas, (ONU). (2022). *El aire que nos mantiene vivos nos está enfermando, alertan expertos*. Noticias ONU. Mirada global Historias Humanas. Publicado el 7 de septiembre del 2022. https://news.un.org/es/story/2022/09/1514011

Penney, V. (2021). *How Texas' Power Generation Failed During the Storm, In Charts.* The New York Times. Publicado el 19 de febrero del 2021.
https://www.nytimes.com/interactive/2021/02/19/climate/texas-storm-power-generation-charts.html

Rappazzo, K.M., Nichols, J.L., Rice, R.B. & Luben, T.J. (2021). *Ozone exposure during early pregnancy and preterm birth: A systematic review and meta-analysis.* Environmental Research, 198, 111317. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111317.

Rodríguez-Sánchez, V.M., Rosas, U., Calva-Vásquez, G. & Sandoval-Zapotitla, E. (2020). Does *Acid Rain Alter the Leaf Anatomy and Photosynthetic Pigments in Urban Trees?*. Plants (Basel), 8; 9(7):862. doi: 10.3390/plants9070862

Sáenz, R. & Kork, M., 1999. Monitoreo de la calidad del aire en América Latina. https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/55453/monitoreocalidadal_spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, (SEDEMA). (2012). *Calidad del aire en la Ciudad de México, informe 2011*. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico. http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/informe_anual_calidad_aire_2011/#p=6.

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, (SEDEMA). (2016). *Calidad del aire en la Ciudad de México, informe 2015*. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico. http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/informe-2015-calidad-del-aire-en-la-ciudad-de-mexico/mobile/index.html

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, (SEDEMA). (2017) *Calidad del aire en la Ciudad de México. Informe Anual 2016*. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico. http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/informe-2016-calidad-del-aire-en-la-ciudad-de-mexico/mobile/index.html

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, (SEDEMA). (2023a*). Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2020*. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Proyectos de Calidad del Aire. Ciudad de México. http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventario-emisiones-cdmx-2020/inventario-emisiones-cdmx-2020.pdf

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, (SEDEMA). (2023b). *Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe anual 2020*. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire. http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/informe-anual-calidad-del-aire-

2020.pdf

Secretaría de Salud, (SSA). (2021). *Informe Integral de COVID-19 en México*. Gobierno de México. Número 2 | 01 de diciembre de 2021.Dirección General de Epidemiología. Gobierno de México. https://coronavirus.gob.mx/wp-content/uploads/2023/08/Info-02-23-Int_COVID-19.pdf

Servicio Meteorológico Nacional, (SMN, CONAGUA). (2021a). *Reporte del Clima en México. Octubre 2021.* Comisión Nacional del Agua. Año 11, Número 10. https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/RC-Octubre21.pdf

Servicio Meteorológico Nacional, (SMN, CONAGUA). (2021b). *Reporte del Clima en México. Diciembre 2020.* Comisión Nacional del Agua. Año 10, número 12. https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/RC-Diciembre20.pdf

Servicio Meteorológico Nacional, (SMN, CONAGUA). (2022). *Reporte del Clima en México. Reporte Anual 2021.* Comisión Nacional del Agua. https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/Anual2021.pdf.

Sistema de Aguas de la Ciudad de México, (SACMEX) (2021). *Base de datos de precipitación en estaciones pluviales de la CDMX, año 2021*.

Sosa_Echeverría, R., Jiménez, A. L., Del Carmen, M., Álvarez, P. S., Hernández, E., Vega, E., Palomera, M. J., Retama, A., & Gay, D. A. (2023). *Nitrogen and sulphur compounds in ambient air and in wet atmospheric deposition at Mexico City Metropolitan Area.* Atmospheric Environment, 292, 119411. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119411

Thangavel, P., Park, D., & Lee, Y.C. (2022). *Recent Insights into Particulate Matter (PM2.5)-Mediated Toxicology in Humans: An Overview. Int. J. Environ. Res. Public Health,* 2022, *19*(12), 7511; https://doi.org/10.3390/ijerph19127511

United Nations Environment Programme, (UNEP). (2021a). *Regulating Air Quality: The first*

global assessment of air pollution legislation. United Nations ISBN No: 978-92-807-3872-8. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/36692/GAAPL_ES_FR.pdf

United Nations Environment Programme, (UNEP). (2021b). *Pollution Action Note – Data you need to know*. https://www.unep.org/interactives/air-pollution-note/

U.S. EPA. (2008). *Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems Volume IV: Meteorological Measurements* Version 2.0. March 2008. (Final). U.S. Environmental Protection Agency EPA-454/B-08-002.
https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-10/documents/volume_iv_meteorological_measurements.pdf

U.S.EPA 2013: U.S. EPA. *Integrated Science Assessment (ISA) for Ozone and Related Photochemical Oxidants* (Final Report, Feb 2013). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-10/076F, 2013. https://assessments.epa.gov/isa/document/&deid=247492

U.S. EPA. (2019). *Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter*. (Final Report, Dec 2019). U.S. Environmental Protection Agency. Washington, DC, EPA/600/R-19/188, 2019. https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NCEA&dirEntryId=347534

U.S. EPA. (2024). *Health Effects of Ozone Pollution.* https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/health-effects-ozone-pollution

U.S. EPA. (2024). *What is PM?*. https://www3.epa.gov/region1/airquality/pm-what-is.html

World Health Organization, (WHO). (2016). *Burning opportunity: clean household energy for health, sustainable development, and wellbeing of women and children, Air quality and health, Environment, Climate Change and Health*, ISBN: 9789241565233.
https://www.who.int/publications/i/item/9789241565233

World Meteorological Organization, (WMO). (2022). *State of the Global Climate 2021*. WMO-No. 1290.
https://library.wmo.int/records/item/56300-state-of-the-global-climate-2021?language_id=13&back=&offset=1

Zhang, L., Wang, J., Wang, S., Wang, C., Yang, F., y Li, T. (2024). *Chemical characteristics of long-term acid rain and its impact on lake water chemistry: A case study in Southwest China*. Journal of Environmental Sciences, Volume 138, 121-131. https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.03.028.

Anexo 1

Sistema de Monitoreo Atmosférico de la CDMX

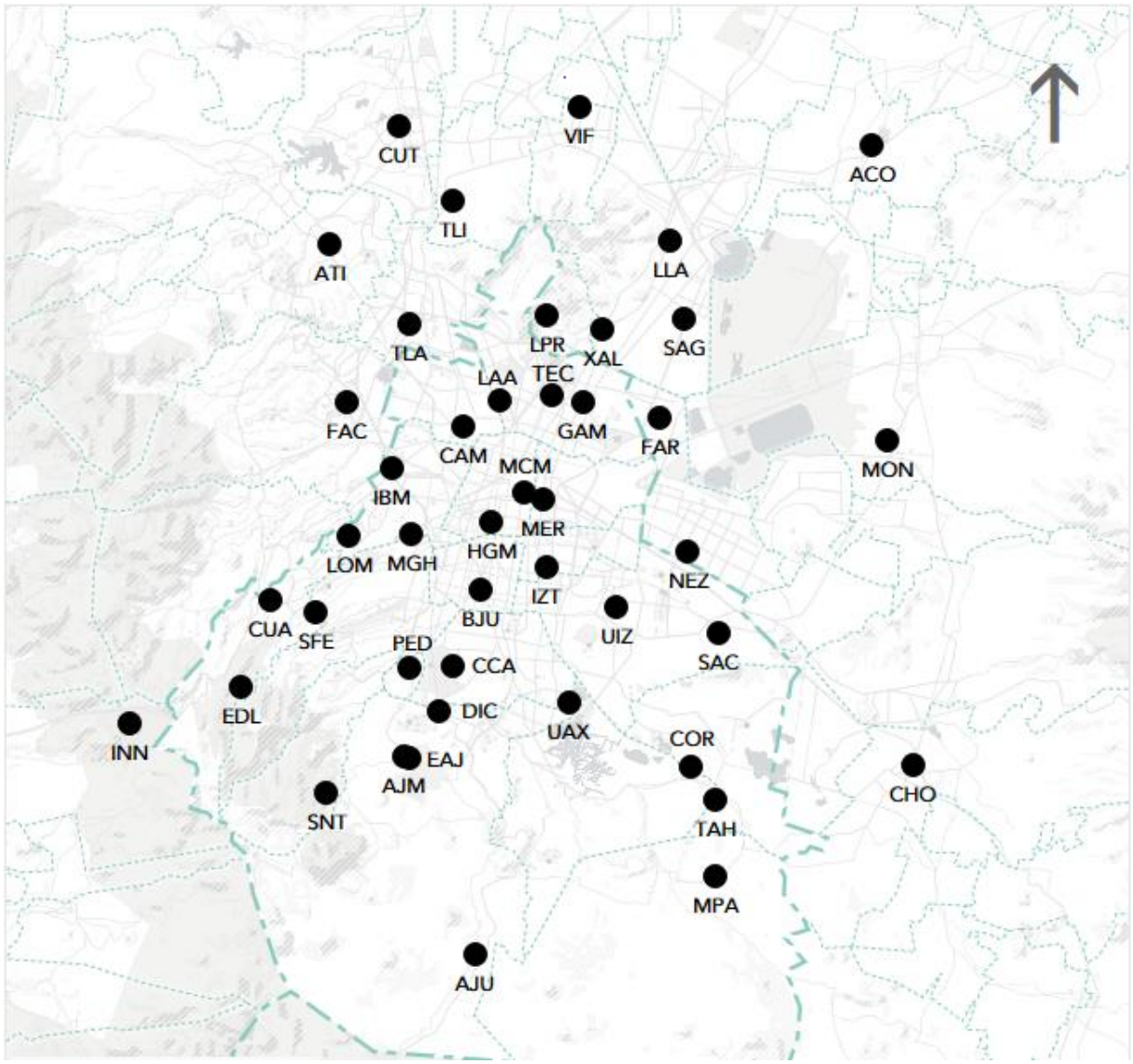


Figura A.I.1. Distribución de los sitios del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México

Red Automática de Monitoreo Atmosférico
(RAMA)

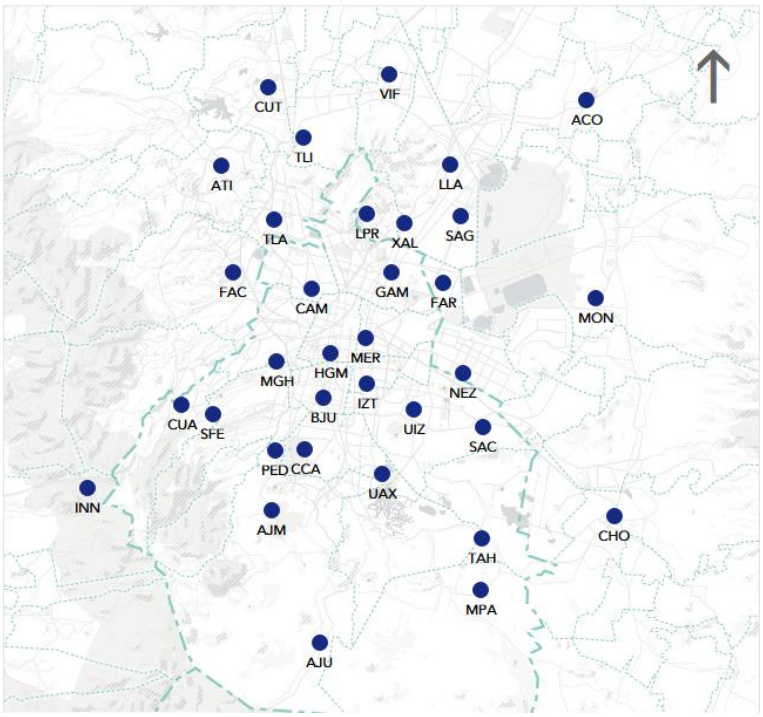


Figura A.I.2. Estaciones de la RAMA en operación durante 2021.

Red Manual de Monitoreo Atmosférico
(REDMA)

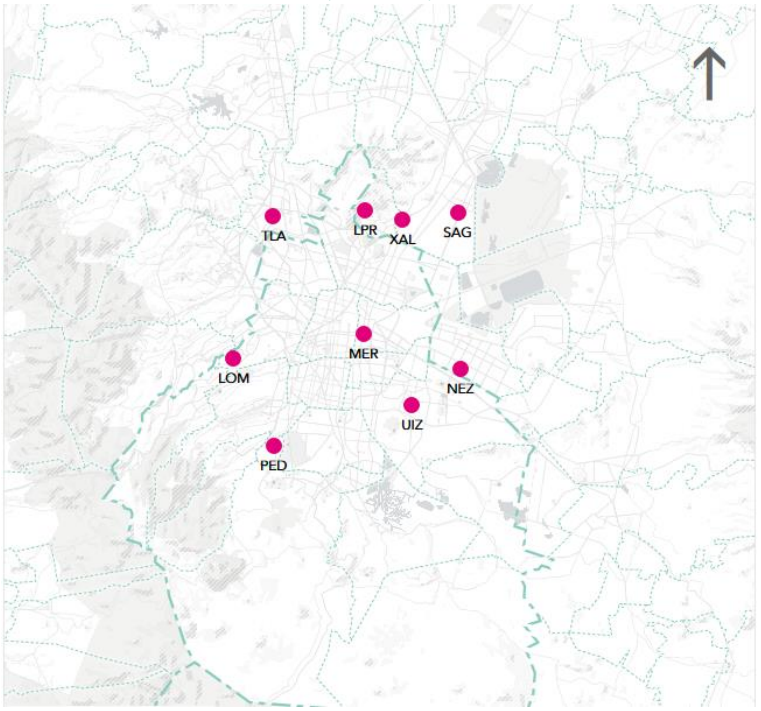


Figura A.I.3. Estaciones de la REDMA en operación durante 2021

Red de Meteorología y Radiación Solar
(REDMET)

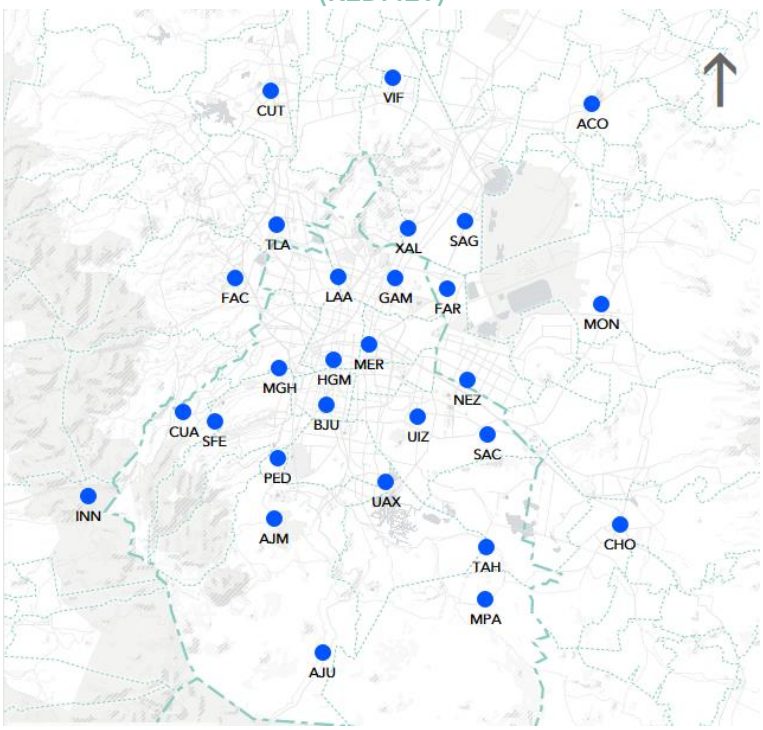


Figura A.I.4. Estaciones de la REDMET en operación durante 2021

Red de Depósito Atmosférico
(REDDA)

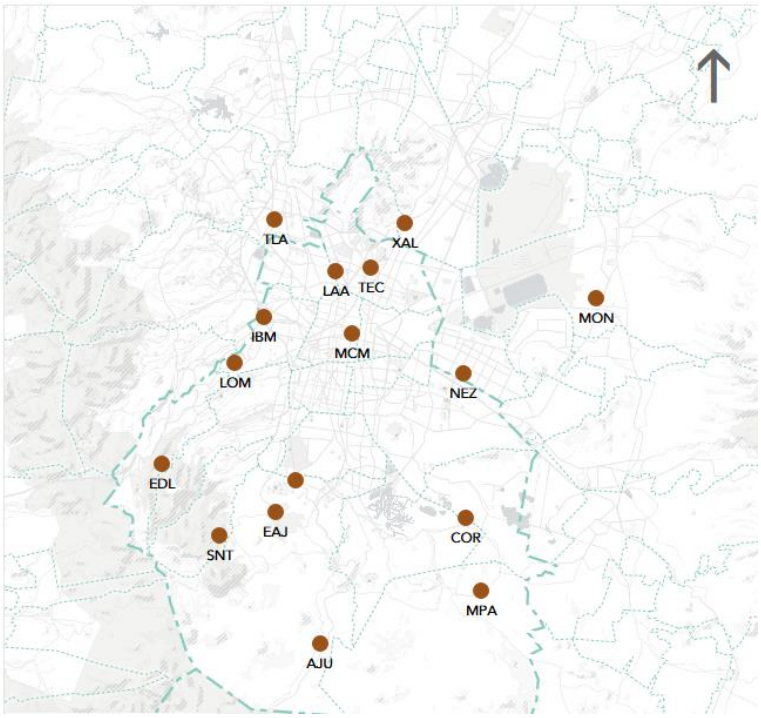


Figura A.I.5. Estaciones de la REDDA en operación durante 2021

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

Entidad	Alcaldía o Municipio	Estación	Clave	Inicio operación	Parámetros								
					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									

	Cuenta con equipo analizador sí generó información en 2021
	Cuenta con equipo analizador, pero no generó datos en 2021
	No cuenta con analizador

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						
	M. 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						

	Cuenta con equipo analizador sí generó información en 2021
	Cuenta con equipo analizador, pero no generó datos en 2021
	No cuenta con analizador

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								
		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								

	Cuenta con equipo analizador sí generó información en 2021
	Cuenta con equipo analizador, pero no generó datos en 2021
	No cuenta con analizador

Anexo 2

Tabla A.2.1. Períodos con falta de datos por mantenimiento u otra causa, durante 2021, en las estaciones de monitoreo de la **RAMA y REDMET** ubicadas en la CDMX.

Alcaldía	Estación	Clave	Red	Parámetro	Inicio	Hora	Fin	Hora	Motivo
Álvaro Obregón	Pedregal	PED	RAMA	O_3	04/12/21	01:00	20/12/21	01:00	Registro de ceros
				CO	04/12/21	01:00	31/12/21	23:00	Falla en equipo, registro de ceros
				PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_{CO}	10/10/21	01:00	26/10/21	02:00	Falla de equipo
Azcapotzalco	Camarones	CAM	RAMA	SO_2	27/07/21	21:00	28/09/21	01:00	Falla de equipo
				NO, NO_2, NOx	17/08/21	10:00	14/09/21	01:00	Falla aire acondicionado
Benito Juárez	Benito Juárez	BJU	RAMA	NO_2, O_3	12/01/21	12:00	29/01/21	01:00	Mantenimiento en laboratorio
			REDMET	TMP	01/07/21	01:00	07/08/21	01:00	Valores erróneos
Coyoacán	Centro Ciencias de Atmósfera	CCA	RAMA	CO, NO, NO_2, NOx, O^3, $PM_{2.5}$	08/10/21	09:00	29/10/21	04:00	Mantenimiento en laboratorio
	UAM Xochimilco	UAX	RAMA	CO, NO, NO2, NOx, O3, SO2, PM2.5	17/12/21	13:00	31/12/21	23:00	Sin enlace
			REDMET	RH, TMP, WDR, WSP	17/12/21	13:00	31/12/21	23:00	Sin enlace
Cuajimalpa	Cuajimalpa	CUA	RAMA	CO, NO, NO_2, NOx, O_3, PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2	01/01/21	01:00	31/03/21	01:00	Sin enlace, reactivada 24/01/21, falta reinstalación de equipo
				PM_{10}	31/05/21	20:00	09/07/21	02:00	Mantenimiento en laboratorio
				PM_{10}	10/08/21	23:00	21/10/21	06:00	Mantenimiento mayor
				SO_2	01/01/21	01:00	02/06/21	02:00	Falla de equipo y en bomba
			REDMET	TMP, RH	01/01/21	01:00	25/03/21	01:00	Sin enlace, reactivada 24/01/21, en observación
				TMP, RH	08/12/21	16:00	31/12/21	23:00	Datos soreestimados
				WSP, WDR	01/01/21	01:00	31/12/21	23:00	Sin enlace hasta marzo
	Santa Fe	SFE	RAMA	CO, NO, NO_2, NOx, O_3, PM_{10}, $PM_{2.5}$, PMCO, SO_2	26/03/21	17:00	04/05/21	01:00	Sin enlace, falla eléctrica prolongada
				PM_{10}, $PM_{2.5}$. PM_{CO}	25/10/21	15:00	10/11/21	04:00	Mantenimiento en laboratorio
			REDMET	RH, TMP	26/03/21	17:00	30/04/21	01:00	Sin enlace, falla eléctrica prolongada
				WDR, WSP	19/02/21	01:00	19/05/21	01:00	Sin enlace, no registra variación
Cuauhtémoc	Hospital General de México	HGM	RAMA	CO, SO_2, NO, NO_2, NOx, PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_{CO}	01/01/21	01:00	31/12/21	23:00	Fuera de línea falta de consumibles, opera REDMET
Gustavo A. Madero	Gustavo A. Madero	GAM	RAMA	PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_{CO}	13/04/21	11:00	31/12/21	23:00	Mantenimiento en laboratorio

Tabla A.2.1. (Continuación) Períodos con falta de datos por mantenimiento u otra causa, durante 2021, en las estaciones de monitoreo de la **RAMA y REDMET** ubicadas en la CDMX.

Alcaldía	Estación	Clave	Red	Parámetro	Inicio	Hora	Fin	Hora	Motivo
Iztacalco	Iztacalco	**IZT**	RAMA	O_3, CO, NO, NO_2, NOx, SO_2, PM_{10}	01/01/21	01:00	13/05/21	01:00	Se apaga por falta de consumibles y condiciones en el sitio
				CO	19/10/21	18:00	19/11/21	01:00	Mantenimiento en laboratorio, falla de aire acondicionado
				NO, NO_2, NOx, O_3, PM_{10}, SO_2	19/10/21	18:00	06/11/21	11:00	Mantenimiento en laboratorio, falla de aire acondicionado
Iztapalapa	Santiago Acahualtepec	**SAC**	RAMA	CO	19/06/21	01:00	01/08/21	01:00	Mantenimiento en laboratorio, falla de aire acondicionado
				NO, NO_2, NOx, O_3, SO_2	19/06/21	01:00	06/07/21	01:00	Mantenimiento en laboratorio, falla de aire acondicionado
				$PM_{2.5}$	16/02/21	21:00	08/05/21	02:00	Mantenimiento en laboratorio, falla de aire acondicionado
				SO_2	07/10/21	08:00	31/12/21	23:00	Retiro de equipo para mantenimiento
			REDMET	RH, TMP	01/01/21	01:00	01/08/21	01:00	Se instalan sensores el 29/07, en observación
				WDR, WSP	28/07/21	12:00	02/09/21	01:00	Mantenimiento en laboratorio
	UAM Iztapalapa	**UIZ**	REDMET	TMP	28/05/21	01:00	12/08/21	16:00	Datos erróneos
				TMP	26/08/21	01:00	29/09/21	16:00	Datos erróneos
				WDR, WSP	05/10/21	01:00	31/12/21	23:00	Datos erróneos
Miguel Hidalgo	Miguel Hidalgo	**MGH**	RAMA	PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_{CO}	01/01/21	01:00	31/12/21	23:00	Prueba de recepción de datos equipo nuevo
				SO_2	26/07/21	06:00	01/08/21	01:00	Fuera de línea por falla eléctrica
			REDMET	TMP	01/01/21	01:00	20/05/21	01:00	Valores sobreestimados, fuera de línea
				WSP, WDR	18/03/21	01:00	20/05/21	01:00	Falla del equipo
Milpa Alta	Milpa Alta	**MPA**	RAMA	CO, NO, NO_2, NOx, SO_2, PM_{10}, $PM_{2.5}$, PMCO	24/05/21	18:00	03/09/21	01:00	Sin enlace
				PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_{CO}	01/01/21	01:00	17/03/21	02:00	Sin monitor de partículas
			REDMET	RH, TMP, WSP, WDR	01/01/21	01:00	17/03/21	02:00	Sin enlace

Tabla A.2.1. (Continuación) Períodos con falta de datos por mantenimiento u otra causa, durante 2021, en las estaciones de monitoreo de la **RAMA y REDMET** ubicadas en la CDMX.

Alcaldía	Estación	Clave	Red	Parámetro	Inicio	Hora	Fin	Hora	Motivo
Tlalpan	Ajusco Medio	AJM	RAMA	CO, NO, NO2, NOx, PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_{CO}, SO_2	01/0/21	00:00	31/12/21	23:00	Se apagan instrumentos por falta de consumibles
			REDMET	T, RH	01/01/21	00:00	31/12/21	23:00	Mantenimiento en laboratorio
				WSP, WDR	04/02/21	01:00	31/12/21	23:00	Falta de datos
	Ajusco	AJU	RAMA	NO, NO_2, NOx	01/01/21	00:00	31/12/21	23:00	Sin analizador
				O_3	17/01/21	15:00	06/05/21	01:00	Sin enlace, se hace servicio, no funciona aire acondicionado.
				$PM_{2.5}$	01/01/21	01:00	08/05/21	02:00	Sin enlace, se hace servicio, no funciona aire acondicionado
				$PM_{2.5}$ y O_3	24/11/21	11:00	18/12/21	01:00	Sin enlace, no funciona aire acondicionado
			REDMET	WSP, WDR	17/01/21	15:00	09/04/21	01:00	Sin enlace
				TMP	13/01/21	14:00	09/04/21	01:00	Se da de baja canal, datos erróneos.
				RH	01/01/21	01:00	09/04/21	01:00	Fuera de línea, pendiente reemplazo del sensor
				WSP, WDR	07/12/21	00:00	31/12/21	23:00	Sin enlace se retira sensor para mantenimiento
Venustiano Carranza	Merced	MER	REDMET	TMP	01/02/21	01:00	02/09/21	02:00	Datos erróneos
Xochimilco	Tláhuac	TAH	RAMA	CO, SO_2, O_3, NO, NO_2, NOx, PM_{10}	05/03/21	14:00	27/03/21	18:00	Fuera de línea falla aire acondicionado
				CO, SO_2, O_3, NO, NO_2, NOx, PM_{10}	20/07/21	19:00	01/09/21	01:00	Sin enlace
			REDMET	RH, TMP	20/07/21	19:00	01/09/21	01:00	Sin enlace
				WDR, WSP	20/07/21	18:00	25/11/21	01:00	Sin enlace, datos erróneos

Tabla A.2.2. Períodos con falta de datos por mantenimiento u otra causa, durante 2021, en las estaciones de monitoreo de la **RAMA y REDMET** ubicadas en el Estado de México.

Municipio	Estación	Clave	Red	Parámetro	Inicio	Hora	Fin	Hora	Motivo
Acolman	Acolman	**ACO**	RAMA	CO, NO, NO_2, NOx, O_3, SO_2	01/01/21	01:00	06/03/21	01:00	Mantenimiento mayor
				CO, NO, NO_2, NOx, O_3, SO_2, PM_{10}	09/04/21	15:00	22/04/21	02:00	Falla del aire acondicionado
			REDMET	RH	01/01/21	01:00	13/04/21	01:00	Sin enlace
Atizapán	Atizapán	**ATI**	RAMA	CO, NO, NO_2, NOx, SO_2, O_3	26/10/21	16:00	24/11/21	01:00	Falla del aire acondicionado
				PM_{10}	22/01/21	09:00	23/03/21	03:00	Baja de canal por desfase
				SO_2	24/01/21	07:00	23/03/21	02:00	Fuera de línea
Chalco	Chalco	**CHO**	RAMA	NO, NO_2, NOx, O_3, PM_{10}, SO_2	01/01/21	01:00	13/03/21	01:00	Sin enlace
				CO	01/01/21	01:00	02/05/21	04:00	Sin enlace
				SO_2	30/05/21	20:00	01/08/21	01:00	Falla de equipo
			REDMET	WDR, WSP	01/01/21	01:00	13/03/21	01:00	Sin enlace
				RH, TMP	01/01/21	01:00	01/06/21	01:00	Sin enlace
Coacalco de Berriozábal	Villa de las Flores	**VIF**	RAMA	O3	26/0121	01:00	16/04/21	06:00	Falla del aire acondicionado
				CO, NO, NO_2, NOx, SO_2	26/01/21	01:00	02/05/21	04:00	Falla del aire acondicionado
				PM_{10}	26/01/21	13:00	06/02/21	02:00	Falla del aire acondicionado
				PM_{10}	01/03/21	19:00	15/04/21	02:00	Mantenimiento en laboratorio
				PM_{10}	31/07/21	02:00	14/07/21	02:00	Mantenimiento en laboratorio
Cuautitlán Izcalli	Cuautitlán	**CUT**	RAMA	SO_2	01/11/21	12:00	04/12/21	04:00	Falla del aire acondicionado
				O_3, NO, NO_2, NOx	01/11/21	12:00	17/11/21	13:00	Falla del aire acondicionado
Ecatepec de Morelos	San Agustín	**SAG**	RAMA	NO, NO_2, NOx, O_3, PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_{CO}	07/04/21	13:00	30/04/21	01:00	Falla del aire acondicionado
				CO, NO, NO_2, NO_3, O_3	01/07/21	01:00	16/07/21	00:00	Rotura de toma de muestra
				SO_2	07/04/21	13:00	16/07/21	00:00	Mantenimiento en laboratorio
				SO_2	26/09/21	08:00	31/12/21	23:00	Datos erróneos
				CO	11/12/21	01:00	31/12/21	01:00	Bloqueo de equipo
			REDMET	RH	15/02/21	01:00	27/05/21	01:00	Datos erróneos
				TMP	14/04/21	09:00	27/05/21	01:00	Falla del aire acondicionado
				TMP	22/07/21	01:00	01/09/21	01:00	Datos erróneos
	Los Laureles	**LLA**	RAMA	O_3	01/01/21	01:00	09/07/21	01:00	Falla del equipo
				CO, NO, NO_2, NOx, SO_2	01/01/21	01:00	31/12/21	23:00	Mantenimiento mayor
	Xalostoc	**XAL**	RAMA	CO, NO, NO_2, NOx, O_3, PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_{CO}, SO_2	01/01/21	01:00	31/12/21	23:00	Apagada por COVID-19
			REDMET	TMP, RH, WDR, WSP	04/02/21	23:00	30/03/21	04:00	Sin enlace
				TMP, RH, WDR, WSP	05/11/21	02:00	04/12/21	01:00	Sin enlace

Tabla A.2.2. (Continuación) Períodos con falta de datos por mantenimiento u otra causa, durante 2021, en las estaciones de monitoreo de la **RAMA y REDMET** ubicadas en el Estado de México.

Municipio	Estación	Clave	Red	Parámetro	Inicio	Hora	Fin	Hora	Motivo
Naucalpan de Juárez	FES Acatlán	FAC	RAMA	CO, NO, NO_2, NOx, O_3, SO_2, PM_{10}	29/06/21	10:00	21/07/21	01:00	Falla del aire acondicionado
Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	NEZ	RAMA	CO, NO, NO_2, NOx, O_3	20/05/21	01:00	04/06/21	01:00	Sin enlace
				SO_2	14/05/21	01:00	04/06/21	01:00	Datos erróneos
				CO, NO, NO_2, NOx, O_3, SO_2	13/10/21	10:00	29/10/21	04:00	Falla en regulador de voltaje
				PM_{10}	01/01/21	01:00	01/03/21	02:00	Inicia mediciones
				PM_{10}	23/06/21	14:00	03/09/21	02:00	Datos erróneos
				$PM_{2.5}$	14/06/21	13:00	03/09/21	02:00	Datos erróneos
				WDR, WSP	06/07/21	06:00	31/12/21	23:00	Datos erróneos
	FES Aragón	FAR	REDMET	NO_2	14/08/21	18:00	14/09/21	16:00	Falla eléctrica, equipo bloqueado
				O_3	11/07/21	18:00	14/09/21	16:00	Equipo bloqueado, cambio de lámpara
Ocoyoacac	Investigaciones Nucleares	INN	RAMA	CO	22/09/21	15:00	22/10/21	01:00	Mantenimiento en laboratorio
				O_3, SO_2	30/09/21	11:00	22/10/21	01:00	Mantenimiento en laboratorio
				PM_{10}	13/02/21	03:00	26/05/21	06:00	Mantenimiento en laboratorio
Texcoco	Montecillo	MON	RAMA	CO	19/05/21	06:00	02/06/21	01:00	Bloqueo de equipo
				CO	18/06/21	18:00	03/07/21	17:00	Falla aire acondicionado
				CO, NO, NO_2, NOx, O_3	31/08/21	15:00	20/09/21	18:00	Sin enlace
				O_3	06/06/21	12:00	03/07/21	16:00	Bloqueo de equipo
				$PM_{2.5}$	01/01/21	01:00	12/02/21	02:00	Falla de equipo
				$PM_{2.5}$	12/03/21	13:00	31/03/21	02:00	Fuera de línea por desfase de datos
				SO_2	18/01/21	16:00	17/02/21	01:00	Mantenimiento en laboratorio
				SO_2	01/03/21	01:00	23/03/21	13:00	Datos erróneos
				SO_2	04/08/21	12:00	01/11/21	05:00	Mantenimiento en laboratorio
Tlalnepantla de Baz	La Presa	LPR	RAMA	NO, NO_2, NOx	01/01/21	01:00	31/12/21	23:00	Retiro de equipo
	Tlalnepantla	TLA	RAMA	NO, NO_2, NOx	24/02/21	18:00	19/03/21	01:00	Datos erróneos
				PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_{CO}	18/11/21	09:00	03/12/21	02:00	Bloqueo de equipo
Tultitlán	Tultitlán	TLI	RAMA	CO, SO_2	01/01/21	01:00	01/05/21	01:00	Reinstalación equipo
				NO, NO_2, NOx	01/01/21	01:00	15/04/21	01:00	Acondicionamiento por reinstalación o
				O_3	01/01/21	01:00	21/04/21	12:00	Acondicionamiento por reinstalación
				PM_{10}	01/01/21	01:00	25/03/21	02:00	Acondicionamiento posterior a reinstalación
				PM_{10}	01/05/21	11:00	20/05/21	02:00	Datos erróneos
				PM_{10}	11/07/21	21:00	26/08/21	02:00	Fuera de línea por desfase de datos

Tabla A.2.3. Períodos con falta de datos por mantenimiento u otra causa, en las estaciones de monitoreo de la **REDMA**.

Alcaldía	Estación	Clave	Red	Parámetro	Fecha	Motivo
Álvaro Obregón	Pedregal	PED	REDMA	$PM_{2.5}$, PM_{10}, PST	10/01/2021	Sin acceso
				$PM_{2.5}$	11/03/2021	Blanco
					09/06/2021	Falla equipo
					16/06/2021	Blanco
					02/08/2021	Falla equipo
					13/10/2021	Falla equipo
Iztapalapa	UAM Iztapalapa	UIZ	REDMA	$PM_{2.5}$, PM_{10}, PST	04/01/2021	Sin acceso
					09/02/2021	Sin acceso
					17/03/2021	Sin acceso
				PST	20/04/2021	Falla equipo
					22/04/2023	Falla equipo
				$PM_{2.5}$, PM_{10}, PST	10/05/2021	Sin acceso
				PST	16/05/2021	Filtro
				PM_{10}	15/06/2021	Dato inválido
				PST	09/07/2021	Falla equipo
					31/10/2021	Falla equipo
Miguel Hidalgo	Lomas	LOM	REDMA	PM_{10},	2021	Sin acceso por COVID
Venustiano Carranza	Merced	MER	REDMA	$PM_{2.5}$	28/04/2021	Falla eléctrica
					10/05/2021	Falla eléctrica
					28/05/2021	Falla equipo
				$PM_{2.5}$, PM_{10}	09/06/2021	Falla eléctrica
				$PM_{2.5}$	15/06/2021	Falla eléctrica
				PM_{10}	14/08/2021	Falla equipo
					07/09/2021	Falla eléctrica
					25/09/2021	Falla eléctrica
					01/10/2021	Falla equipo

Tabla A.2.3. (Continuación) Períodos con falta de datos por mantenimiento u otra causa, en las estaciones de monitoreo de la **REDMA** ubicadas en el Estado de México, durante 2021.

Municipio	Estación	Clave	Red	Parámetro	Motivo
Ecatepec	San Agustín	SAG	REDMA	$PM_{2.5}$	Sin acceso
					Falla eléctrica
					Falla eléctrica
					Falla eléctrica
				PM_{10}	Dato erróneo
	Xalostoc	XAL	REDMA	$PM_{2.5}$, PM_{10}, PST	Sin acceso por Covid
Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	NEZ	REDMA	PM_{10},	Sin acceso
Tlalnepantla	Tlalnepantla	TLA	REDMA	PM_{10}	Falla equipo
				PST	Falla equipo
					Falla eléctrica
	La Presa	LPR	REDMA	PM_{10}	Filtro
					Falla equipo
					Falla equipo
					Falla equipo

Anexo 3

Nuevas estaciones de monitoreo atmosférico

Durante este año no operó ninguna nueva estación ni se modificó la ubicación de las existentes.

Estaciones de monitoreo sin datos durante 2021

Durante el año 2021 continuaron las restricciones ocasionadas por la pandemia de COVID-19 para el acceso en algunas estaciones de monitoreo de la ZMCM. La tabla A.3.1 presenta las estaciones que no operaron al 100% en este año.

Tabla A.3.1 Estaciones que se vieron afectadas por las restricciones durante la pandemia por COVID-19.

Estación	Clave	Causa	SO_2	CO	O_3	NO	NO_2	NOx	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{CO}	TMP	WSP	UV-A	UV-B
Ajusco Medio	AJM	Sin acceso por COVID-19													
Chalco	CHO	Sin consumibles													
FES Aragón	FAR	Sin consumibles													
Hospital Gral. México	HGM	Sin acceso por COVID-19													
Los Laureles	LLA	Sin consumibles													
La Presa	LPR	Se retiraron instrumentos													
Miguel Hidalgo	MGH	Se retiraron instrumentos													
San Agustín	SAG	Sin acceso por COVID-19													
Tlalnepantla	TLA	Se retiraron instrumentos													
Xalostoc	XAL	Sin acceso por COVID-19													

	Cuenta con equipo analizador sí generó información en 2021
	Cuenta con equipo analizador, pero no generó datos en 2021
	No cuenta con analizador

Anexo 4

Tabla A.4.1. Estadísticas básicas para **dióxido de azufre 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 1 h y que cumplen con los requerimientos del apartado A.1.2.2 para el valor límite de 24 h 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 24 h	Máximo promedio 1 h	Cumple
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	14	36	No
	Benito Juárez	BJU	96	4	130	3	0	6	2	1	1	1	3	6	25	56	No
	Camarones	CAM	80	3	162	4	0	9	3	1	1	2	4	9	33	84	No
	Centro C. Atmósfera	CCA	96	4	125	2	0	4	1	1	1	1	2	5	19	50	Sí
	Cuajimalpa	CUA	57	2	57	2	0	4	1	1	1	1	2	5	21	38	No
	Hospital Gral. México	HGM	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	27	78	No
	Iztacalco	IZT	56	2	37	2	0	3	1	1	1	1	2	4	22	50	No
	Merced	MER	96	4	251	4	0	7	3	1	1	2	4	7	30	67	Sí
	Miguel Hidalgo	MGH	87	3	99	3	0	6	2	0	1	2	3	7	24	56	Sí
	Milpa Alta	MPA	64	2	46	2	0	3	1	0	1	1	2	4	10	27	No
	Pedregal	PED	93	4	88	2	0	4	1	0	1	1	2	4	17	43	Sí
	Santiago Acahualtepec	SAC	67	3	122	2	0	5	1	1	1	1	2	4	17	43	No
	Santa Fe	SFE	80	3	94	2	0	4	1	0	1	1	2	4	17	37	Sí
	Tláhuac	TAH	74	2	58	2	0	2	1	1	1	1	2	3	10	29	No
	UAM Xochimilco	UAX	92	4	79	2	0	3	1	1	1	1	2	4	16	35	Sí
	UAM Iztapalapa	UIZ	76	2	76	2	0	4	1	1	1	1	2	4	19	49	Sí
Estado de México	Acolman	ACO	73	3	47	1	0	2	0	0	1	1	1	2	10	32	No
	Atizapán	ATI	73	2	131	3	0	5	2	1	1	1	3	7	25	71	No
	Chalco	CHO	59	1	26	2	0	1	1	1	1	1	2	3	6	22	No
	Cuautitlán	CUT	82	3	257	4	0	8	3	1	1	2	4	8	26	90	No
	FES Acatlán	FAC	91	4	136	4	0	7	3	1	1	2	4	9	26	74	No
	FES Aragón	FAR	86	4	185	3	0	6	1	0	1	1	2	5	23	58	No
	Instituto de Investigaciones Nucleares	INN	90	3	70	1	0	2	0	1	1	1	1	2	7	18	No
	Los Laureles	LLA	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	29	68	No
	La Presa	LPR	93	4	118	3	0	5	2	1	1	2	3	5	19	N/A	No
	Montecillo	MON	52	1	35	2	0	2	1	0	1	1	2	3	7	25	No
	Nezahualcóyotl	NEZ	79	2	206	3	0	7	2	1	1	1	3	5	27	64	No
	San Agustín	SAG	40	1	137	3	0	7	1	0	1	1	2	5	35	101	No
	Tlalnepantla	TLA	95	4	179	6	0	10	3	1	2	3	5	12	43	102	No
	Tultitlán	TLI	62	2	217	4	0	8	3	1	1	2	4	9	44	126	No
	Villa de las Flores	VIF	69	2	117	4	0	7	2	1	1	2	3	8	38	107	No
	Xalostoc	XAL	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	18	62	No

N/A: No aplica

Tabla A.4.2. Estadísticas básicas para **dióxido de nitrógeno en la CDMX y EDOMEX**, las unidades son ppb.

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	Número de horas >210 ppb	Cumple
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	0	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Benito Juárez	BJU	92	4	130	23	0	12	16	9	13	21	29	39	0	Sí
	Camarones	CAM	89	3	122	29	3	14	18	13	18	26	36	48	0	Sí
	C. Ciencias Atmósfera	CCA	90	3	75	19	1	10	13	9	12	18	25	32	0	Sí
	Cuajimalpa	CUA	69	3	105	18	2	10	11	7	11	16	22	30	0	Sí
	Gustavo A. Madero	GAM	92	4	92	23	3	13	19	7	12	21	31	41	0	Sí
	Hospital Gral. de México	HGM	0	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Iztacalco	IZT	56	2	103	27	5	13	15	13	18	25	33	42	0	Sí
	Merced	MER	96	4	132	29	2	14	17	14	20	27	37	47	0	Sí
	Miguel Hidalgo	MGH	97	4	114	26	4	12	16	13	17	24	33	43	0	Sí
	Milpa Alta	MPA	68	2	36	7	0	5	6	2	3	5	9	14	0	Sí
	Pedregal	PED	93	4	69	18	2	10	12	8	11	16	23	31	0	Sí
	Santiago Acahualtepec	SAC	90	4	121	22	1	13	17	8	12	19	29	39	0	Sí
	Santa Fe	SFE	78	3	79	18	2	9	10	8	12	16	22	29	0	Sí
	Tláhuac	TAH	75	2	65	15	0	9	12	5	8	14	20	27	0	Sí
	UAM Xochimilco	UAX	90	4	79	19	1	10	14	7	11	18	25	32	0	Sí
	UAM Iztapalapa	UIZ	71	2	106	27	1	13	18	12	17	26	35	43	0	Sí
Estado de México	Acolman	ACO	76	3	83	13	1	8	10	5	8	12	18	23	0	Sí
	Atizapán	ATI	87	3	91	18	0	11	13	7	10	15	23	34	0	Sí
	Chalco	CHO	72	3	72	19	1	10	13	7	11	17	24	32	0	Sí
	Cuautitlán	CUT	85	4	88	18	0	11	14	6	10	16	24	33	0	Sí
	FES Acatlán	FAC	90	3	116	23	1	13	16	9	13	20	29	40	0	Sí
	FES Aragón	FAR	82	3	71	19	1	11	17	6	10	18	27	35	0	Sí
	Los Laureles	LLA	0	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	La Presa	LPR	0	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Montecillo	MON	85	3	68	15	1	9	13	5	8	13	21	29	0	Sí
	Nezahualcóyotl	NEZ	85	4	92	23	0	12	17	9	14	21	31	40	0	Sí
	San Agustín	SAG	80	3	98	21	3	11	15	9	13	20	28	36	0	Sí
	Tlalnepantla	TLA	90	3	110	28	3	13	16	14	18	25	34	44	0	Sí
	Tultitlán	TLI	67	3	105	21	4	12	16	8	12	19	28	38	0	Sí
	Villa de las Flores	VIF	69	2	80	17	2	11	15	6	9	15	24	32	0	Sí
	Xalostoc	XAL	0	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

N/A: No aplica

Tabla A.4.3. Estadísticas básicas para **monóxido de carbono en la CDMX y EDOMEX**, las unidades son ppm.

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 8 h (11 ppm)	Cumple
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	0	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Benito Juárez	BJU	96	4	2.4	0.4	0	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.5	Sí
	Camarones	CAM	95	4	2.8	0.5	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.3	0.6	1.0	2.0	Sí
	C. Ciencias Atmósfera	CCA	90	3	1.6	0.3	0	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.9	Sí
	Cuajimalpa	CUA	70	3	1.8	0.3	0	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.9	Sí
	Hospital Gral. de México	HGM	0	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Iztacalco	IZT	52	1	3.8	0.5	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.4	0.6	1	2.2	Sí
	Merced	MER	97	4	3.6	0.5	0	0.4	0.5	0.1	0.2	0.4	0.7	1	2.3	Sí
	Miguel Hidalgo	MGH	96	4	2.8	0.4	0	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.9	Sí
	Milpa Alta	MPA	65	2	2.1	0.2	0	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	1.4	Sí
	Pedregal	PED	87	3	1.4	0.3	0	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	Sí
	Santiago Acahualtepec	SAC	83	3	4.4	0.5	0	0.5	0.4	0.1	0.2	0.4	0.6	1.1	2.6	Sí
	Santa Fe	SFE	80	3	1.3	0.3	0	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.5	1.0	Sí
	Tláhuac	TAH	72	2	2.6	0.4	0	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.7	Sí
	UAM Xochimilco	UAX	92	4	2.0	0.4	0	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.4	Sí
	UAM Iztapalapa	UIZ	73	2	3.1	0.4	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.3	0.6	0.9	2.2	Sí
Estado de México	Acolman	ACO	76	3	2.0	0.2	0	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	1.1	Sí
	Atizapán	ATI	89	3	2.5	0.3	0	0.3	0.2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.7	1.2	Sí
	Chalco	CHO	62	2	3.9	0.5	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.4	0.6	1	2.1	Sí
	FES Acatlán	FAC	91	4	2.8	0.4	0	0.4	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.9	1.5	Sí
	FES Aragón	FAR	89	4	2.4	0.4	0	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.4	Sí
	Instituto de Investigaciones Nucleares	INN	88	3	1.2	0.2	0	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	Sí
	Los Laureles	LLA	0	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	La Presa	LPR	96	4	3.7	0.6	0	0.5	0.5	0.2	0.3	0.5	0.8	1.2	2.6	Sí
	Montecillo	MON	74	2	2.6	0.4	0	0.4	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.9	Sí
	Nezahualcóyotl	NEZ	84	4	4.5	0.5	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.4	0.6	1.0	2.4	Sí
	San Agustín	SAG	76	3	3	0.4	0	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.4	Sí
	Tlalnepantla	TLA	93	4	2.7	0.4	0	0.3	0.4	0.1	0.2	0.4	0.6	0.9	1.5	Sí
	Tultitlán	TLI	63	2	3.2	0.4	0	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	2.1	Sí
	Villa de las Flores	VIF	68	2	3.0	0.4	0	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	2.0	Sí
	Xalostoc	XAL	0	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

N/A: No aplica

Tabla A.4.4. Estadísticas básicas para **ozono en la CDMX y EDOMEX**, las unidades son ppb

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	Número de horas >95 ppb (1 h)	Máximo promedio 8 h (70 ppb)	Cumple
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	0	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Ajusco	AJU	60	1	144	31	0	22	27	6	15	25	42	62	53	104	No
	Benito Juárez	BJU	92	4	150	31	0	28	37	2	9	22	46	72	281	123	No
	Camarones	CAM	95	4	126	22	0	23	33	1	3	15	36	58	22	88	No
	C. Ciencias de Atmósfera	CCA	89	3	159	34	0	30	42	3	10	26	52	80	371	126	No
	Cuajimalpa	CUA	65	2	150	35	1	25	31	8	17	29	48	72	182	106	No
	Gustavo A. Madero	GAM	89	4	143	30	0	28	40	2	6	22	46	72	193	110	No
	Hospital Gral. de México	HGM	0	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Iztacalco	IZT	56	2	154	25	0	26	32	1	4	16	36	66	92	108	No
	Merced	MER	97	4	144	26	0	27	36	1	4	16	40	68	171	108	No
	Miguel Hidalgo	MGH	96	4	148	30	0	28	37	2	8	21	45	73	293	115	No
	Milpa Alta	MPA	67	2	137	47	3	22	30	21	30	43	60	78	160	109	No
	Pedregal	PED	90	4	141	33	0	27	34	5	13	25	47	73	258	114	No
	Santiago Acahualtepec	SAC	89	4	115	27	0	21	31	3	9	22	40	58	30	85	Sí
	Santa Fe	SFE	80	3	158	35	0	27	33	6	15	28	48	75	278	121	No
	Tláhuac	TAH	74	2	133	34	0	26	36	6	14	27	50	73	156	108	No
	UAM Xochimilco	UAX	91	4	142	31	0	26	37	3	10	24	47	70	170	103	No
	UAM Iztapalapa	UIZ	78	2	152	30	0	28	41	2	6	21	47	73	195	119	No
Estado de México	Acolman	ACO	76	3	116	24	0	19	28	2	8	21	36	53	3	87	No
	Atizapán	ATI	89	3	124	25	0	21	27	2	9	19	36	56	31	88	No
	Chalco	CHO	72	3	116	30	0	25	39	2	7	24	46	67	54	92	No
	Cuautitlán	CUT	84	3	154	26	0	26	40	1	2	18	42	65	106	120	No
	FES Acatlán	FAC	90	4	145	29	0	25	32	3	10	23	42	67	157	106	No
	FES Aragón	FAR	73	3	130	31	0	26	39	2	8	25	47	70	117	103	No
	Instituto de Investigaciones Nucleares	INN	90	3	137	33	1	18	23	14	20	30	43	58	24	95	No
	Los Laureles	LLA	44	2	119	20	0	20	26	1	4	14	30	51	8	83	No
	La Presa	LPR	94	4	135	26	0	23	33	1	6	20	39	61	85	96	No
	Montecillo	MON	76	2	122	28	0	23	39	1	6	25	45	62	18	92	No
	Nezahualcóyotl	NEZ	80	3	146	30	0	27	39	2	8	23	47	70	160	117	No
	San Agustín	SAG	79	3	107	21	0	19	26	1	6	17	32	50	3	79	No
	Tlalnepantla	TLA	95	4	134	26	0	24	33	2	6	18	39	63	86	96	No
	Tultitlán	TLI	62	2	160	26	0	24	33	1	7	19	40	64	54	118	No
	Villa de las Flores	VIF	69	2	118	27	0	23	33	2	8	21	41	62	24	86	No
	Xalostoc	XAL	0	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

N/A: No aplica

Tabla A.4.5. Estadísticas básicas para **óxidos de nitrógeno 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	0	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Camarones	CAM	89	3	498	48	3	44	37	15	21	33	58	102
	Centro Ciencias de la Atmósfera	CCA	90	3	154	25	1	18	19	9	13	20	32	48
	Cuajimalpa	CUA	69	3	206	25	2	20	16	9	13	19	29	45
	Hospital Gral. de México	HGM	0	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Iztacalco	IZT	56	2	322	39	5	30	28	15	20	30	48	74
	Merced	MER	96	4	385	50	3	40	38	17	24	37	62	98
	Miguel Hidalgo	MGH	97	4	414	45	5	41	32	15	21	31	53	93
	Pedregal	PED	93	4	154	23	2	16	17	9	12	19	29	43
	Santiago Acahualtepec	SAC	90	4	415	35	1	36	27	9	14	23	41	75
	Santa Fe	SFE	78	3	128	25	2	17	16	10	14	20	30	48
	Tláhuac	TAH	75	2	160	20	1	15	17	6	9	16	26	38
	UAM Xochimilco	UAX	90	4	317	27	1	24	23	7	12	20	35	56
	UAM Iztapalapa	UIZ	71	2	300	40	1	29	31	13	20	32	51	78
Estado de México	Acolman	ACO	76	3	157	20	1	17	18	6	8	14	26	42
	Atizapán	ATI	87	3	191	27	0	25	21	7	11	18	32	57
	Chalco	CHO	72	3	440	38	1	41	30	10	14	24	44	84
	Cuautitlán	CUT	85	4	344	37	0	42	34	7	11	21	45	87
	FES Acatlán	FAC	90	3	260	39	2	34	30	11	17	27	47	86
	FES Aragón	FAR	0	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Los Laureles	LLA	0	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	La Presa	LPR	0	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Montecillo	MON	85	3	339	29	1	38	26	5	8	15	34	71
	Nezahualcóyotl	NEZ	85	4	445	35	0	32	28	11	15	25	43	71
	San Agustín	SAG	80	3	323	35	3	32	29	11	15	24	44	76
	Tlalnepantla	TLA	90	3	264	47	3	36	33	17	24	35	57	93
	Tultitlán	TLI	67	3	329	35	4	35	27	10	14	23	41	73
	Villa de las Flores	VIF	69	2	236	30	2	30	25	7	11	19	36	68
	Xalostoc	XAL	0	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

N/A: No aplica

Tabla A.4.6. Estadísticas básicas para **óxido nítrico en la CDMX y EDOMEX**, las unidades son ppb.

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	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	I.
	Camarones	CAM	89	431	20	0	36	18	1	2	5	20	56
	C. Ciencias Atmósfera	CCA	90	108	6	0	11	5	0	1	1	6	18
	Cuajimalpa	CUA	69	149	7	0	13	5	1	1	3	6	17
	Hospital Gral. de México	HGM	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	I.
	Iztacalco	IZT	56	282	12	0	22	12	1	1	4	13	35
	Merced	MER	96	317	21	0	32	20	2	3	8	23	56
	Miguel Hidalgo	MGH	97	370	19	0	34	17	1	2	6	19	53
	Pedregal	PED	93	108	5	0	9	0	0	1	1	4	13
	Santiago Acahualtepec	SAC	90	355	13	0	27	10	1	1	3	11	37
	Santa Fe	SFE	78	101	7	0	11	6	1	1	3	7	19
	Tláhuac	TAH	75	136	5	0	9	3	0	1	1	4	12
	UAM Xochimilco	UAX	90	288	8	0	18	7	0	0	1	7	26
	UAM Iztapalapa	UIZ	90	237	13	0	21	12	1	2	5	14	37
Estado de México	Acolman	ACO	76	128	6	0	12	5	0	1	2	6	19
	Atizapán	ATI	87	162	8	0	17	6	0	1	2	7	24.8
	Chalco	CHO	72	394	19	0	36	14	1	3	6	17	55
	Cuautitlán	CUT	85	309	18	0	37	16	0	1	2	17	58
	FES Acatlán	FAC	90	215	16	0	26	14	1	2	5	16	47
	FEA Aragón	FAR	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	I.
	Los Laureles	LLA	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	I.
	La Presa	LPR	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	I.
	Montecillo	MON	85	318	14	0	33	9	0	1	1	10	44
	Nezahualcóyotl	NEZ	85	396	12	0	24	10	0	1	3	11	34
	San Agustín	SAG	80	295	14	0	26	11	1	2	4	13	43
	Tlalnepantla	TLA	90	216	19	0	28	17	2	4	9	21	52
	Tultitlán	TLI	67	280	13	0	26	10	1	1	3	11	37
	Villa de las Flores	VIF	69	224	12	0	23	9	0	1	3	10	37
	Xalostoc	XAL	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	I.

I: Inválido; SS: Sin suficiencia; C: Datos completos; N/A: No aplica

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

Entidad	Estación	Clave	Método de muestreo	% Datos válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
CDMX	UAM Iztapalapa	UIZ	Alto volumen	84	185	88	14	43	71	34	56	85	127	143
EDOMEX	Tlalnepantla	TLA	Alto volumen	100	167	93	27	35	59	48	63	93	123	139

Tabla A.4.8. Estadísticas básicas para las **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, sólo se utilizaron las estaciones con ≥ 75% de muestreos válidos y con suficiencia trimestral ≥ 3.

Entidad	Estación	Clave	Método de muestreo	% Datos válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLIMIENTO NOM			
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Suficiencia trimestral	Máximo promedio 24 h (75 µg/m³)	Promedio anual (40 µg/m³)	Cumple
Ciudad de México	Lomas	**LOM**	FRM 16.67 lpm	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	**I**
	Merced	**MER**	FRM Alto Vol.	82	79	45	6	18	30	21	29	45	59	66	3	79	42	**No**
	Pedregal	**PED**	FRM 16.67 lpm	98	69	30	5	14	21	15	21	29	42	47	4	69	31	**Sí**
	UAM Iztapalapa	**UIZ**	FRM Alto Vol.	95	87	43	4	20	31	20	25	41	56	70	4	87	44	**No**
Estado de México	La Presa	**LPR**	FRM Alto Vol.	92	120	55	10	27	47	24	33	53	79	89	4	120	55	**No**
	Nezahualcóyotl	**NEZ**	FRM Alto Vol.	88	94	43	6	22	36	17	23	38	59	75	3	94	45	**No**
	Tlalnepantla	**TLA**	FRM Alto Vol.	98	93	47	13	17	22	27	36	43	57	68	4	93	46	**No**
	Xalostoc	**XAL**	FRM Alto Vol.	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	**I**

I: Inválido; SS: Sin suficiencia; C: Datos completos; N/A: 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/m^3 calculadas a condiciones locales de presión y temperatura.

Entidad	Estación	Clave	Tipo de analizador continuo	% 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	TEOM (30°C)	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Benito Juárez	BJU	TEOM (30°C)	95	288	32	2	18	23	12	19	30	42	55
	Camarones	CAM	TEOM (30°C)	79	724	45	3	28	31	18	28	41	59	76
	Cuajimalpa	CUA	BETA (35°C)	18	150	33	1	16	20	15	22	32	42	53
	Gustavo A. Madero	GAM	BETA (35°C)	26	624	52	4	29	31	24	34	49	65	80
	Hospital Gral. de México	HGM	TEOM (30°C)	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Iztacalco	IZT	BETA (35°C)	54	230	31	1	20	24	10	17	27	41	57
	Merced	MER	TEOM (30°C)	97	411	39	2	23	32	13	21	35	53	70
	Miguel Hidalgo	MGH	TEOM (30°C)	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Milpa Alta	MPA	TEOM (30°C)	44	231	35	2	24	29	10	17	29	46	66
	Pedregal	PED	TEOM (30°C)	90	417	29	1	19	23	9	15	26	38	51
	Santa Fe	SFE	TEOM (30°C)	75	306	27	2	17	21	9	15	24	36	49
	Tláhuac	TAH	TEOM (35°C)	70	378	40	1	31	38	8	17	33	55	79
	UAM Iztapalapa	UIZ	TEOM (30°C)	70	825	45	1	28	33	16	26	41	59	77
Estado de México	Acolman	ACO	BETA (35°C)	92	647	45	1	32	38	13	22	38	60	84
	Atizapán	ATI	TEOM (35°C)	77	785	30	1	25	26	7	14	25	40	58
	Chalco	CHO	TEOM (35°C)	71	650	43	1	35	41	10	19	34	60	88
	Cuautitlán	CUT	TEOM (35°C)	82	584	48	1	37	39	14	24	41	63	90
	FES Acatlán	FAC	TEOM (35°C)	86	448	39	1	28	32	11	20	34	52	73
	Instituto Investigaciones Nucleares	INN	TEOM (30°C)	64	169	17	1	13	15	5	8	14	23	34
	Nezahualcóyotl	NEZ	TEOM (30°C)	55	982	48	1	37	39	13	25	43	64	86
	San Agustín	SAG	TEOM (30°C)	73	533	48	2	30	36	17	27	43	63	85
	Tlalnepantla	TLA	TEOM (30°C)	87	460	43	1	24	28	18	26	38	54	72
	Tultitlán	TLI	TEOM (35°C)	55	809	46	1	38	39	13	22	38	61	90
	Villa de las Flores	VIF	TEOM (35°C)	60	726	55	1	48	48	12	24	43	72	111
	Xalostoc	XAL	TEOM (30°C)	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

I: Inválido; SS: Sin suficiencia; C: Datos completos; N/A: No aplica

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

Entidad	Estación	Clave	Método de muestreo	% Datos válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLIMIENTO NOM			
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Suficiencia trimestral	Máximo promedio 24 h (45 µg/m³)	Promedio anual (12 µg/m³)	Cumple
CDMX	Merced	MER	FRM 16.67 lpm	85	37	20	5	7	12	12	14	19	26	29	3	37	20	No
	Pedregal	PED	FRM 16.67 lpm	90	36	14	3	7	8	7	10	14	18	23	4	36	14	No
	UAM Iztapalapa	UIZ	FRM 16.67 lpm	93	37	19	4	8	12	10	14	19	25	30	4	37	19	No
EDOMEX	San Agustín	SAG	FRM 16.67 lpm	78	33	16	3	7	10	9	11	14	21	25	3	33	16	No
	Tlalnepantla	TLA	FRM 16.67 lpm	100	43	20	7	8	8	11	16	18	24	29	4	43	20	No
	Xalostoc	XAL	FRM 16.67 lpm	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	I

I: Inválido; SS: Sin suficiencia; C: Datos completos; N/A: No aplica

Tabla A.4.11. 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/m³ calculadas a condiciones locales de presión y temperatura

Entidad	Estación	Clave	Tipo de analizador continuo	% 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	TEOM (30°C)	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Ajusco	AJU	BETA (35°C)	51	112	12	1	9	11	3	6	11	17	24
	Benito Juárez	BJU	TEOM (30°C)	95	126	19	1	11	14	7	11	17	25	33
	Camarones	CAM	TEOM (30°C)	79	126	23	1	13	17	8	13	21	30	40
	C. Ciencias Atmósfera	CCA	BETA (35°C)	89	81	18	1	11	13	6	10	16	23	32
	Gustavo A. Madero	GAM	TEOM-FDMS (30°C)	26	117	23	1	13	16	9	14	22	30	40
	Hospital Gral. de México	HGM	TEOM (30°C)	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Merced	MER	TEOM (30°C)	97	122	23	1	13	17	8	13	20	30	40
	Miguel Hidalgo	MGH	TEOM (30°C)	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Milpa Alta	MPA	TEOM (30°C)	44	126	19	1	14	16	5	9	16	25	35
	Pedregal	PED	TEOM (30°C)	90	88	17	1	10	14	5	9	15	23	31
	Santiago Acahualtepec	SAC	TEOM (30°C)	71	256	23	1	17	19	6	11	19	30	43
	Santa Fe	SFE	TEOM (30°C)	75	71	14	1	9	11	4	8	12	19	27
	UAM Xochimilco	UAX	BETA (35°C)	91	126	20	1	12	17	6	10	17	27	36
	UAM Iztapalapa	UIZ	TEOM (30°C)	70	114	22	1	13	18	7	12	20	30	39
Estado de México	FES Aragón	FAR	TEOM (30°C)	90	124	20	1	12	15	6	11	18	26	35
	Inst. Investigaciones Nucleares	INN	TEOM (30°C)	64	152	10	1	8	9	3	5	9	14	20
	Montecillo	MON	TEOM (30°C)	70	131	20	1	13	17	5	10	17	27	37
	Nezahualcóyotl	NEZ	BETA (35°C)	66	199	23	1	16	18	7	13	21	31	42
	San Agustín	SAG	TEOM (30°C)	73	123	21	1	13	17	6	11	19	28	37
	Tlalnepantla	TLA	TEOM (30°C)	87	90	21	1	12	16	8	12	19	28	38
	Xalostoc	XAL	TEOM (30°C)	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

I: Inválido; SS: Sin suficiencia; C: Datos completos; N/A: No aplica

Tabla A.4.12. Estadísticas básicas de la concentración horaria de **PMcoarse** reportada por los equipos de **monitoreo continuo**, las unidades son µg/m^3 calculadas a condiciones locales de presión y temperatura.

Entidad	Estación	Clave	Tipo de analizador continuo	% 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	TEOM (30°C)	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Benito Juárez	BJU	TEOM (30°C)	9	240	13	1	10	12	4	6	11	18	25
	Camarones	CAM	TEOM (30°C)	79	628	23	1	21	19	6	114	19	30	42
	Gustavo A. Madero	GAM	TEOM (30°C)	26	533	28	2	22	19	11	17	26	36	46
	Hospital Gral. de México	HGM	TEOM (30°C)	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Merced	MER	TEOM (30°C)	97	371	17	1	15	19	3	5	13	24	34
	Miguel Hidalgo	MGH	TEOM (30°C)	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Milpa Alta	MPA	TEOM (30°C)	44	185	16	1	15	15	3	6	12	21	33
	Pedregal	PED	TEOM (30°C)	90	380	12	1	12	11	3	5	9	16	23
	Santa Fe	SFE	TEOM (30°C)	75	274	13	1	11	11	4	6	10	17	25
	UAM Iztapalapa	UIZ	TEOM (30°C)	70	763	23	1	20	18	6	12	20	30	41
Estado de México	Instituto Investigaciones Nucleares	INN	TEOM (30°C)	64	143	7	1	8	8	1	2	5	10	16
	San Agustín	SAG	TEOM (30°C)	73	477	28	1	22	23	7	13	23	36	52
	Tlalnepantla	TLA	TEOM (30°C)	87	432	21	1	18	18	8	10	18	28	40
	Xalostoc	XAL	TEOM (30°C)	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

I: Inválido; SS: Sin suficiencia; c: Datos completos; N/A: No aplica

Tabla A.4.13. Estadísticas básicas para **temperatura ambiente en la CDMX y EDOMEX**, todas 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	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Ajusco	AJU	72	22.7	11.0	-3.9	4.4	5.6	5.6	8.5	10.8	14.1	16.7
	Benito Juárez	BJU	81	29.4	17.9	6.4	4.3	6.2	12.5	14.8	17.3	21	23.9
	Cuajimalpa	CUA	70	25.6	14.6	5.7	3.4	4.8	10.9	12.0	13.9	16.8	19.6
	Gustavo A. Madero	GAM	96	30.4	18.3	5.4	4.3	6.0	13.1	15.4	17.7	21.4	24.3
	Hospital Gral. de México	HGM	99	29.4	18.1	6.6	4.1	5.8	13.2	15.1	17.5	20.9	23.8
	Lab. Análisis Ambiental	LAA	99	29.3	17.7	5.2	4.5	6.4	12.4	14.5	17	20.9	24
	Merced	MER	42	27.8	17.1	6.8	4.0	6.1	11.8	14.2	16.6	20.3	22.6
	Miguel Hidalgo	MGH	62	28.3	17.4	8.7	3.6	5.1	13.4	14.9	16.7	20	22.5
	Milpa Alta	MPA	71	26.5	15.3	3.5	4.5	6.9	9.5	11.9	14.6	18.8	21.8
	Pedregal	PED	98	28.6	16.8	4.2	4.2	5.8	11.8	14.0	16.2	19.8	22.8
	Santiago Acahualtepec	SAC	41	28.8	14.0	0.2	5.6	8.2	7.2	10.2	13.1	18.4	22.0
	Santa Fe	SFE	86	27.3	15.4	3	4.5	6.6	9.9	12.2	14.6	18.8	21.6
	Tláhuac	TAH	85	31.5	17.1	4	5.1	7.1	10.7	13.6	16.4	20.7	24.2
	UAM Xochimilco	UAX	96	28.6	16.5	2.6	4.5	6.2	11.0	13.5	16.0	19.7	22.8
	UAM Iztapalapa	UIZ	29	26.7	16.7	7.3	4.0	6.4	11.7	13.6	16.2	20.0	22.3
Estado de México	Acolman	ACO	98	29.2	16.0	0.9	5.1	7.0	9.4	12.8	15.7	19.8	23.0
	Chalco	CHO	58	27.4	16.9	3.5	4.5	6.2	11.4	14.2	16.5	20.4	22.9
	Cuautitlán	CUT	77	32.7	16.6	-2.6	6.6	9.0	7.2	12.8	16.5	21.8	25.2
	FES Acatlán	FAC	100	33.1	17.0	-0.5	6.2	8.8	9.3	13.0	16.2	21.8	25.6
	FES Aragón	FAR	100	31.3	18.8	4.1	4.6	6.3	13.1	15.9	18.4	22.2	25.1
	Instituto Investigaciones Nucleares	INN	99	24.6	11.1	-1.9	9.9	7.4	4.6	7.5	10.6	14.9	17.9
	Montecillo	MON	93	33.2	17.7	1.1	6.0	8.6	9.8	13.6	17.2	22.2	25.8
	Nezahualcóyotl	NEZ	93	28.5	17.5	2.8	4.2	5.8	12.3	14.7	17.0	20.5	23.3
	San Agustín	SAG	72	31.4	17.6	5.4	4.5	6.4	12.1	14.4	17.0	20.8	23.8
	Tlalnepantla	TLA	99	29.0	17.2	4.3	4.4	6.2	11.9	14.2	16.6	20.4	23.3
	Villa de las Flores	VIF	98	30.1	17.2	3.7	4.9	6.8	11.2	14.0	16.6	20.8	24.0
	Xalostoc	XAL	74	28.4	17.6	5.5	3.8	5.4	13.3	14.9	17.1	20.3	22.9

N/A: No aplica

Tabla A.4.14. Estadísticas básicas para **humedad relativa en la CDMX y EDOMEX**, todas 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	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Ajusco	AJU	69	100	81	10	22	31	44	69	90	100	100
	Benito Juárez	BJU	99	90	49	1	21	34	21	33	50	67	76
	Cuajimalpa	CUA	70	91	61	3	20	33	30	45	65	78	85
	Gustavo A. Madero	GAM	94	97	55	3	21	35	25	38	57	73	83
	Hospital Gral. de México	HGM	99	86	46	2	20	32	19	31	46	63	72
	Laboratorio Análisis Ambiental	LAA	99	99	54	4	22	35	24	37	55	72	84
	Merced	MER	100	92	50	1	21	35	20	33	50	68	77
	Miguel Hidalgo	MGH	99	89	46	1	21	35	18	30	46	65	74
	Milpa Alta	MPA	71	87	47	1	20	32	20	31	46	63	74
	Pedregal	PED	98	90	51	2	21	34	23	35	52	69	79
	Santiago Acahualtepec	SAC	41	100	61	5	22	38	30	42	64	80	89
	Santa Fe	SFE	86	94	57	2	21	36	26	40	59	76	84
	Tláhuac	TAH	85	85	46	1	20	32	18	31	47	63	73
	UAM Xochimilco	UAX	96	100	54	3	21	34	24	37	55	71	81
	UAM Iztapalapa	UIZ	84	95	54	1	21	33	25	38	56	71	81
Estado de México	Acolman	ACO	72	100	66	4	24	38	30	48	71	86	96
	Chalco	CHO	58	91	61	8	17	25	37	49	63	74	81
	Cuautitlán	CUT	21	95	49	1	26	47	13	26	49	73	83
	FES Acatlán	FAC	100	92	53	1	24	41	20	33	55	74	85
	FES Aragón	FAR	100	97	54	1	22	36	22	36	55	72	82
	Instituto Investigaciones Nucleares	INN	99	94	66	3	23	37	30	50	73	87	89
	Montecillo	MON	93	91	54	1	23	38	21	36	55	74	83
	Nezahualcóyotl	NEZ	89	88	48	3	20	31	21	33	49	64	74
	San Agustín	SAG	67	100	62	8	22	36	30	44	65	80	90
	Tlalnepantla	TLA	99	86	48	2	20	35	19	31	48	66	74
	Villa de las Flores	VIF	97	100	55	1	23	38	24	37	57	75	85
	Xalostoc	XAL	74	88	50	4	19	29	23	36	52	65	74

N/A: No aplica

Tabla A.4.15. Estadísticas básicas para **velocidad del viento en la CDMX y EDOMEX**, todas las unidades están en m/s.

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										% Calmas	Dirección del viento dominante
				Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90		
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	9	9.2	2.8	0.2	1.5	1.8	1.3	1.7	2.5	3.5	4.8	0	SSE
	Ajusco	AJU	70	8.3	2.4	0.0	1.3	1.6	0.9	1.4	2.2	3.0	4.3	0.7	S
	Benito Juárez	BJU	99	6.7	1.8	0.0	0.9	1.1	0.8	1.1	1.6	2.2	3.0	0.1	NNE
	Cuajimalpa	CUA	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	-
	Gustavo A. Madero	GAM	94	10.0	1.9	0.0	1.2	1.5	0.6	1.0	1.6	2.5	3.7	0.7	NE
	Hospital Gral. de México	HGM	99	9.1	2.4	0.4	1.3	1.7	1.0	1.4	2.1	3.1	4.2	0.1	N
	Lab. Análisis Ambiental	LAA	99	6.1	1.7	0.0	1.0	1.4	0.5	0.9	1.6	2.3	3.0	0	NNO
	Merced	MER	100	7.1	2.1	0.2	1.1	1.4	1.0	1.3	1.9	2.7	3.7	3	NNE
	Miguel Hidalgo	MGH	83	6.6	1.9	0.0	1.0	1.2	0.8	1.3	1.8	2.5	3.2	0	N
	Milpa Alta	MPA	71	9.8	3.0	0.4	1.4	1.7	1.4	2.0	2.8	3.7	4.8	2.1	SSO
	Pedregal	PED	98	7.3	1.9	0.1	0.9	1.0	0.9	1.3	1.7	2.3	3.1	0	ONO
	Santiago Acahualtepec	SAC	89	9.7	2.3	0.0	1.4	2.0	0.7	1.2	2.0	3.2	4.4	0.8	NNE
	Santa Fe	SFE	60	6.3	2.2	0.1	0.9	1.0	1.1	1.6	2.1	2.6	3.4	0	NO
	Tláhuac	TAH	62	8.3	2.0	0.0	1.3	1.5	0.7	1.1	1.7	2.6	3.8	0	N
	UAM Xochimilco	UAX	96	7.7	2.1	0.0	1.1	1.2	0.9	1.3	1.7	2.5	3.6	3.3	ESE
	UAM Iztapalapa	UIZ	61	7.6	1.8	0.0	1.1	1.5	0.6	0.9	1.5	2.4	3.4	0.2	NE
Estado de México	Acolman	ACO	98	9.8	2.4	0.2	1.4	1.6	1.1	1.4	1.9	3.0	4.4	0.7	NNO
	Chalco	CHO	78	6.6	1.7	0.0	1.2	1.6	0.5	0.8	1.3	2.4	3.4	0.1	ESE
	Cuautitlán	CUT	94	6.0	1.5	0.0	0.9	1.4	0.5	0.7	1.4	2.1	2.7	1.1	NO
	FES Acatlán	FAC	100	7.2	1.7	0.0	0.9	1.1	0.7	1.1	1.6	2.2	3.0	0	NO
	FES Aragón	FAR	100	8.6	2.4	0.3	1.3	1.7	1.1	1.4	2.0	3.1	4.4	2.1	ENE
	Instituto Investigaciones Nucleares	INN	99	7.1	1.5	0.0	1.1	1.6	0.2	0.6	1.2	2.2	2.9	1.6	SE
	Montecillo	MON	93	9.5	2.2	0.0	1.7	2.2	0.4	0.8	1.7	3.0	4.7	0.1	NE
	Nezahualcóyotl	NEZ	49	10.1	2.7	0.0	1.5	2.1	1.1	1.5	2.2	3.6	4.9	0	ENE
	San Agustín	SAG	94	7.0	1.7	0.0	1.0	1.1	0.7	1.1	1.6	2.2	3.0	9.9	NE
	Tlalnepantla	TLA	99	9.3	2.5	0.4	1.2	1.6	1.2	1.6	2.3	3.2	4.2	6.9	NNO
	Villa de las Flores	VIF	25	5.7	1.5	0.0	1.0	1.2	0.5	0.8	1.3	2.0	3.1	0	N
	Xalostoc	XAL	74	13.2	3.0	0.4	2.0	2.4	1.1	1.6	2.4	4.0	6.1	1.6	N

* La dirección predominante corresponde al vector resultante de la suma vectorial de los datos horarios, de donde viene el viento.
N: Norte (0°, 360°); **NNE**: Nor-noreste (22.5°); **NE:** Noreste (45°); **ENE**: Este-noreste (67.5°);
E: Este (90°); **ESE**: Este-sureste (112.5°); **SE**: Sureste (135°); **SSE**: Sursureste (157.5°);
S: Sur (180°); **SSO**: Sur-suroeste (202.5°); **SO**: Suroeste (225°); **OSO**: Oeste-suroeste (247.5°);
O: Oeste (270°); **ONO**: Oeste-noroeste (292.5°); **NO**: Noroeste (315°); **NNO**: Nornoroeste (337.5°).
N/A: No aplica

Tabla A.4.16. Estadísticas básicas para **radiación solar ultravioleta A**, todas 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
CDMX	Lab. Análisis Ambiental	LAA	99	5.387	0.971	0	1.389	1.767	0	0	0.029	1.767	3.389
	Merced	MER	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Milpa Alta	MPA	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Pedregal	PED	98	6.211	1.120	0	1.597	2.049	0	0	0.053	2.049	3.880
	Santa Fe	SFE	86	6.043	1.103	0	1.574	2.042	0	0	0.047	2.042	3.750
EDOMEX	Chalco	CHO	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Cuautitlán	CUT	97	6.242	1.251	0	1.754	2.373	0	0	0.056	2.373	4.276
	FES Acatlán	FAC	100	5.395	1.014	0	1.446	1.883	0	0	0.037	1.883	3.504
	Montecillo	MON	93	6.418	1.148	0	1.615	2.170	0	0	0.050	2.170	3.931
	San Agustín	SAG	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Tlalnepantla	TLA	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Tabla A.4.17. Estadísticas básicas para **radiación solar ultravioleta B**, todas 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
CDMX	Lab. Análisis Ambiental	LAA	99	5.108	0.042	0	0.067	0.064	0	0	0.001	0.064	0.159
	Merced	MER	100	5.448	0.043	0	0.071	0.064	0	0	0.001	0.064	0.168
	Milpa Alta	MPA	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Pedregal	PED	98	6.522	0.050	0	0.082	0.074	0	0	0	0.074	0.194
	Santa Fe	SFE	86	6.265	0.050	0	0.082	0.073	0	0	0	0.073	0.187
EDOMEX	Chalco	CHO	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Cuautitlán	CUT	97	5.887	0.054	0	0.087	0.089	0	0	0	0.089	0.204
	FES Acatlán	FAC	100	5.125	0.043	0	0.068	0.068	0	0	0	0.08	0.163
	Montecillo	MON	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	San Agustín	SAG	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Tlalnepantla	TLA	0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Tabla A.4.18. Estadísticas básicas para **depósito atmosférico húmedo.**

Entidad	Estación	Clave	PP	pH			Depósito total (kg/ha) ANIONES			Depósito total (kg/ha) CATIONES					
			Precipitación total (mm de lluvia)	Mínimo pH	Promedio pH	Porcentaje eventos de lluvia ácida (%)	NO_3^-	SO_4^{-2}	Cl^-	NH_4^+	Ca^{2+}	K^+	H^+	Mg^{2+}	Na^+
CDMX	Ajusco	AJU	1,186	4.6	5.8	36	15.20	19.20	3.60	10.10	6.00	1.20	0.066	0.30	0.80
	Cerro del Tepeyac	TEC	514	4.9	6.4	11	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Corena	COR	—	—	—	—	9.70	10.00	1.70	7.00	4.40	0.80	0.004	0.10	0.30
	Diconsa	DIC	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Ecoguardas Ajusco	EAJ	1,067	4.8	6.4	13	18.30	18.40	2.70	11.40	9.40	1.00	0.022	0.40	0.60
	Ex Convento Desierto Leones	EDL	1,418	5.1	6.4	8	22.70	21.10	3.00	12.30	11.40	1.10	0.024	0.60	0.60
	Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	250	6.3	6.8	0	5.30	5.00	0.50	4.10	2.90	0.30	0.001	0.10	0.23
	Legaria	IBM	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Lomas	LOM	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Milpa Alta	MPA	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Museo de la Ciudad de México	MCM	850	6.0	6.7	0	16.20	15.70	2.30	10.90	9.60	0.90	0.004	0.30	0.60
	San Nicolás Totolapan	SNT	—	—		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
EDOMEX	Montecillo	MON	353	6.2	6.6	0	7.20	6.00	0.90	4.80	3.30	0.30	0.001	0.10	0.20
	Nezahualcóyotl Sur	NEZ	672	5.9	6.8	0	12.70	11.50	1.80	9.00	7.20	0.80	0.003	0.30	0.80
	Tlalnepantla	TLA	757	4.7	6.6	9	16.20	18.90	2.20	10.40	10.90	0.80	0.020	0.60	0.60
	Xalostoc	XAL	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Anexo 5

Tabla 5.1. Activación de Fase de Pre contingencia 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 5.1. (Continuación). Activación de Fase de Pre contingencia a partir de 2001.

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 de 2016 las autoridades Federales decidieron reducir el umbral de activación de la Fase I y se dejó como límite de 155 ppb que correspondía al valor de Pre contingencia, por esto desaparece la Fase de Pre contingencia del PCAA.

Tabla 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	—	—	—	—	—	—	—
2007	—	—	—	—	—	—	—
2008	—	—	—	—	—	—	—
2009	—	—	—	—	—	—	—
2010	—	—	—	—	—	—	—
2011	—	—	—	—	—	—	—
2012	—	—	—	—	—	—	—
2013	—	—	—	—	—	—	—
2014	—	—	—	—	—	—	—
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

*Se activó Contingencia Ambiental Extraordinaria por $PM_{2.5}$ y O_3. El 28/05/2019 se publicó el Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas (PPRECAA) que incluye las Fases Preventiva, I, II y Combinada por PM_{10} o $PM_{2.5}$ y O_3.

Anexo 6

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	

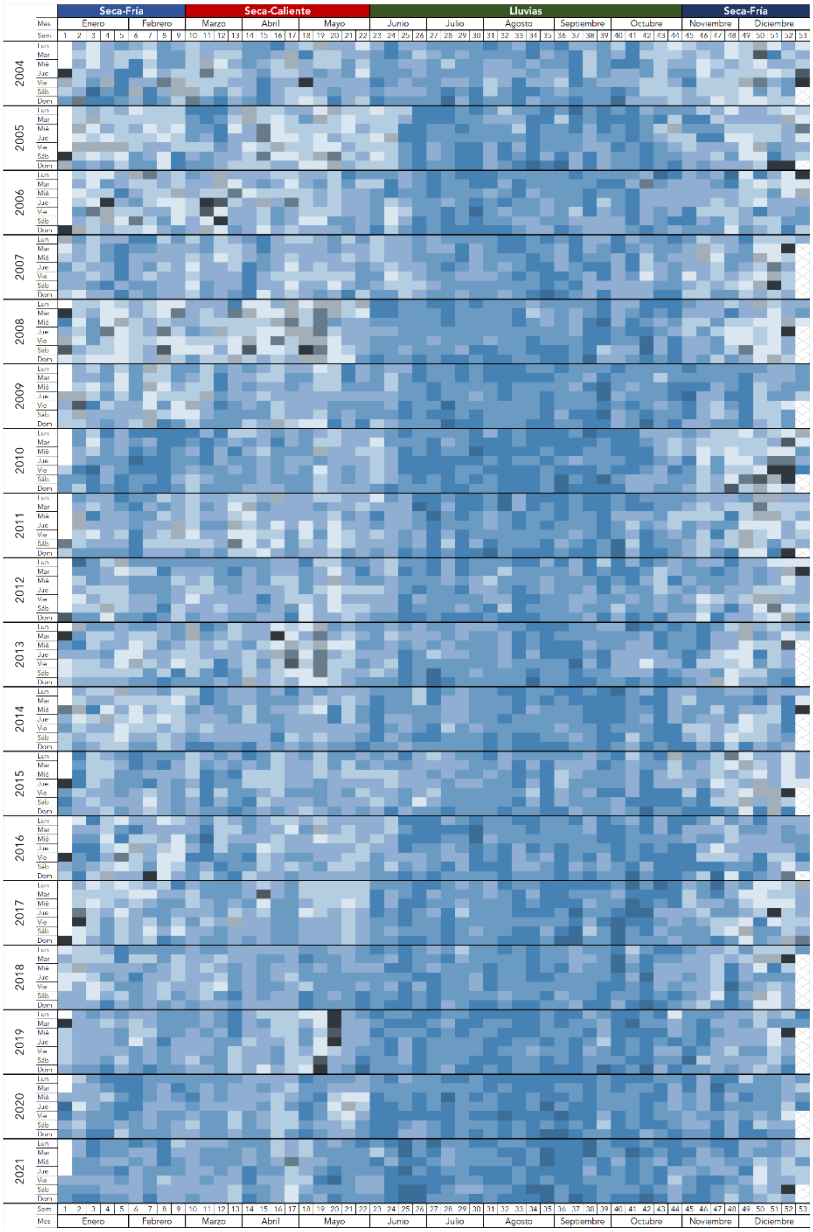


Figura A.VI.1. Mosaico de $PM_{2.5}$. Cada celda es el máximo diario del promedio de 24 h del 2004 al 2021. Para fines comparativos, el color de la celda indica la concentración de $PM_{2.5}$ de acuerdo con los intervalos y a los colores de la escala.

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	

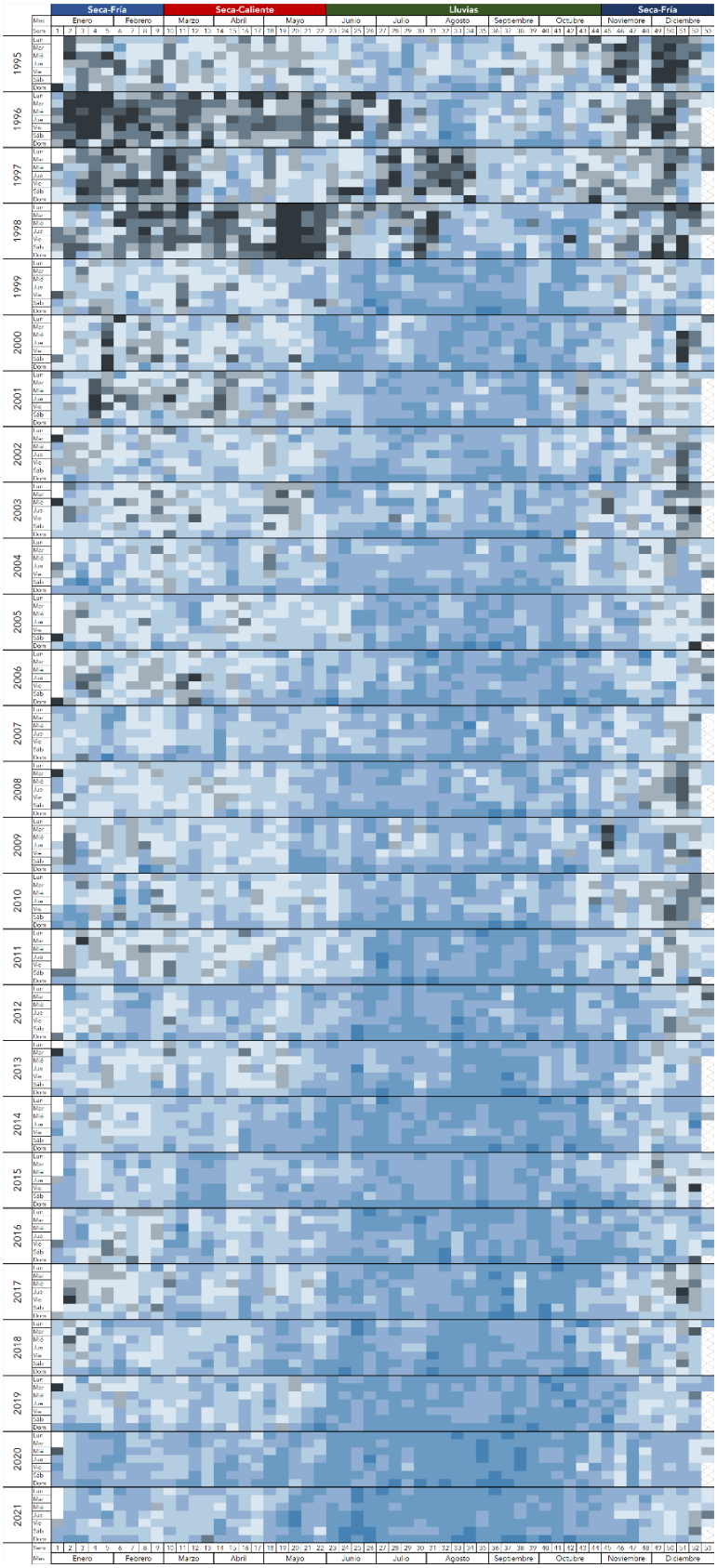


Figura A.VI.2. Mosaico de PM_{10}. Cada celda es el máximo diario del promedio de 24 h del 1995 al 2021. Para fines comparativos, el color de la celda indica la concentración de PM_{10} de acuerdo con los intervalos y a los colores de la escala.

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	

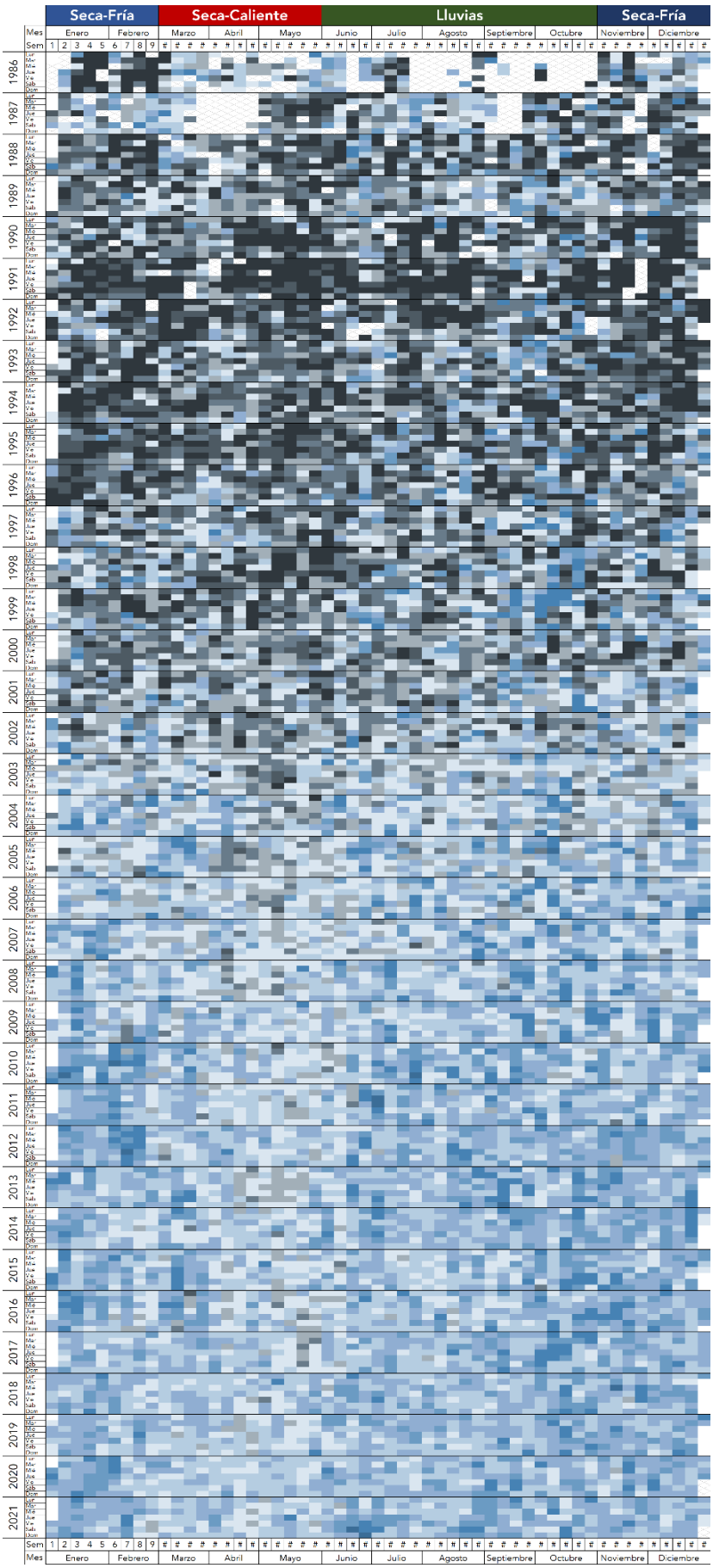


Figura A.VI.3. Mosaico de O_3. Cada celda es el máximo diario del promedio 1 h de 1986 al 2021. Para fines comparativos, el color de la celda indica la concentración de ozono de acuerdo con los intervalos y a los colores de la escala.

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

35 AÑOS 1986-2021
Monitoreo Atmosférico

www.aire.cdmx.gob.mx

@Aire_CDMX

App: AIRE

Disponible para: