



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**ANÁLISIS DE LAS SERIES DE TIEMPO DE LAS
MEDICIONES DE OZONO, DIÓXIDO DE AZUFRE,
DIÓXIDO DE NITRÓGENO, MONÓXIDO DE
CARBONO Y PM₁₀ DEL ÍNDICE AIRE Y SALUD, DE
1992 A 2019, EN LA CDMX**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA
TIERRA**

P R E S E N T A:

**SAYURY GUADALUPE RODRÍGUEZ
VÁZQUEZ**



**DIRECTOR DE TESIS:
VÍCTOR KEVIN CONTRERAS TEREZA**

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatoria

A mi familia, Ros, Danilo y Dana, por su amor y dedicación, los amo.

A Choco, por ser literalmente la mejor compañía en este camino.

Agradecimientos

A la Facultad de Ciencias y a la Universidad Nacional Autónoma de México, por mi educación en la licenciatura.

A la Dirección de Monitoreo Atmosférico y a la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, por los datos proporcionados.

Al Dr. Víctor Kevin Contreras Tereza por darme la oportunidad de trabajar con él y brindarme su apoyo en todo momento.

TABLA DE CONTENIDO

Contenido de Figuras.....	7
Contenido de Tablas	10
1. Resumen.....	11
2. Introducción	13
3. Antecedentes	15
3.1 Contaminación en la Ciudad de México, inicio de la problemática actual.....	15
3.2 Principales contaminantes atmosféricos, porcentaje de emisión y sus efectos en la salud humana	16
3.2.1 Ozono (O ₃).....	19
3.2.2 Dióxido de Azufre (SO ₂).....	25
3.2.3 Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	28
3.2.4 Monóxido de Carbono (CO).....	31
3.2.5 Materia particulada PM ₁₀	35
4. Objetivo general	41
4.1 Objetivos particulares	41
5. Área de estudio.....	42
5.1 Cuenca de México	42
5.2 Condiciones climáticas de la Ciudad de México	43
5.2.1 Estacionalidad.....	43
5.2.2 Temperatura.....	44
5.2.3 Régimen pluvial.....	45
5.2.4 Régimen de vientos	46
5.3 Condiciones sociales en la Ciudad de México.....	48
5.3.1 Territorio.....	48
5.3.2 Consumo energético	49
5.3.3 Transporte y Movilidad	49
5.3.4 Industria.....	51
5.3.5 Comercios y servicios.....	51
5.4 Factores climáticos que determinan la formación y dispersión de contaminantes en la CDMX.....	52
5.4.1 Capa de Mezcla	52
5.4.2 Isla de Calor.....	53

5.4.3	Inversiones térmicas	53
5.4.4	Presión atmosférica.....	54
5.5	Legislación atmosférica en la CDMX	55
5.5.1	Proceso de creación de la legislación atmosférica en la Ciudad de México ..	55
5.5.2	Normas Oficiales Mexicanas y el “Índice AIRE Y SALUD”	59
5.5.3	Programas para mejorar la Calidad del aire.....	63
5.6	Monitoreo de la Calidad del Aire en la Ciudad de México con la Red Automática de Monitoreo Atmosférico.....	65
5.6.1	Principio de Operación del Monitoreo automático de contaminantes.....	68
5.6.1.1	Analizador de Ozono (O ₃)	69
5.6.1.2	Analizador de Dióxido de Azufre (SO ₂).....	69
5.6.1.3	Analizador de Monóxido de Carbono (CO).....	70
5.6.1.4	Analizador de Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	70
5.6.1.5	Muestreador de partículas suspendidas (PM ₁₀ y PM _{2.5})	71
6.	Métodos y MATERIALES	72
6.1	Análisis auto-espectral	72
6.2	Serie de Fourier y Transformada rápida de Fourier.....	75
6.3	Interpolación	77
6.4	Base de datos	78
7.	Desarrollo	79
8.	Resultados	81
8.1	Ozono (O ₃).....	82
8.1.1	Comportamiento histórico, diario y anual	82
8.1.2	Análisis espectral	86
8.2	Dióxido de Azufre (SO ₂)	88
8.2.1	Comportamiento histórico, diario y anual	88
8.2.2	Análisis espectral	92
8.3	Dióxido de Nitrógeno (NO ₂).....	93
8.3.1	Comportamiento histórico, diario y anual	93
8.3.2	Análisis espectral	97
8.4	Monóxido de Carbono (CO)	98
8.4.1	Comportamiento histórico. diario y anual	98
8.4.2	Análisis espectral	102

8.5	Material particulado PM ₁₀	103
8.5.1	Comportamiento histórico, diario y anual	103
8.5.2	Análisis espectral.....	107
8.6	Análisis Espacial y Temporal	108
9.	Discusión.....	110
10.	Conclusiones	124
11.	Bibliografía.....	129

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 3-1 Principales contaminantes atmosféricos, sus fuentes de emisión y sus efectos en la salud humana (Modificado de UAP, 2021).	16
Figura 3-2 Esquema de la contaminación atmosférica por Ozono (Modificado de METEORED, 2022).	20
Figura 3-3 Reacciones químicas en la atmósfera del Dióxido de Azufre y Dióxido de Nitrógeno (Todoesquimica,2022).	25
Figura 3-4 Esquema de las fuentes y evolución del Monóxido de Carbono (CO) en la atmósfera (RETEMA, 2018)	31
Figura 5-1 Ubicación geográfica de la Ciudad de México y sus alcaldías.	42
Figura 5-2 Serie de tiempo de los promedios de la temperatura de 1992 a 2019 (Elaboración propia con datos de SMN, 2021).	44
Figura 5-3 Serie de tiempo de la precipitación acumulada anual de 1992 a 2019. (Elaboración propia con datos de SMN, 2021).	45
Figura 5-4 Acciones implementadas para mejorar la calidad del aire en la Ciudad de México desde principios de los años 90 (SEDEMA, 2018b).	64
Figura 5-5 Ubicación geográfica de las estaciones pertenecientes a la RAMA en la Ciudad de México. La línea punteada corresponde a la delimitación territorial de la CDMX.	67
Figura 6-1 Concepto de la Transformada de Fourier (ICHI, 2022).	75
Figura 7-1 Esquema en que se realizó la interpolación de los datos, de acuerdo con el valor a cierta hora para todos los días del año.	80
Figura 8-1 Promedio diario (azul) y mensual (rojo) de la concentración histórica en [ppb] del Ozono de 1992 a 2019 en las 5 zonas de la CDMX.	82
Figura 8-2 Comportamiento diario de los promedios por hora (panel superior) y comportamiento anual de los promedios mensuales (panel inferior) de la concentración en [ppb] del Ozono de 1992 a 2019 en las 5 zonas de la CDMX.	84
Figura 8-3 Espectro de frecuencia obtenido por medio de la FFT para la concentración en [ppb] del Ozono de 1992 a 2019 en las 5 zonas de la CDMX (h = horas, d = días, a = años).	86

Figura 8-4 Promedio diario (azul) y mensual (rojo) de la concentración histórica en [ppb] del Dióxido de Azufre de 1992 a 2019 en las 5 zonas de la CDMX.....	88
Figura 8-5 Comportamiento diario de los promedios por hora (panel superior) y comportamiento anual de los promedios mensuales (panel inferior) de la concentración en [ppb] del Dióxido de Azufre de 1992 a 2019 en las 5 zonas de la CDMX.	90
Figura 8-6 Espectro de frecuencia obtenido por medio de la FFT para la concentración en [ppb] del Dióxido de Azufre de 1992 a 2019 en las 5 zonas de la CDMX (h = horas, d = días, a = años).	92
Figura 8-7 Promedio diario (azul) y mensual (rojo) de la concentración histórica en [ppb] del Dióxido de Nitrógeno de 1992 a 2019 en las 5 zonas de la CDMX.....	93
Figura 8-8 Comportamiento diario de los promedios por hora (panel superior) y comportamiento anual de los promedios mensuales (panel inferior) de la concentración en [ppb] del Dióxido de Nitrógeno de 1992 a 2019 en las 5 zonas de la CDMX.	95
Figura 8-9 Espectro de frecuencia obtenido por medio de la FFT para la concentración en [ppb] del Dióxido de Nitrógeno de 1992 a 2019 en las 5 zonas de la CDMX (h = horas, d = días, a = años).	97
Figura 8-10 Promedio diario (azul) y mensual (rojo) de la concentración histórica en [ppm] del Monóxido de Carbono de 1992 a 2019 en las 5 zonas de la CDMX.....	98
Figura 8-11 Comportamiento diario de los promedios por hora (panel superior) y comportamiento anual de los promedios mensuales (panel inferior) de la concentración en [ppm] del Monóxido de Carbono de 1992 a 2019 en las 5 zonas de la CDMX.	100
Figura 8-12 Espectro de frecuencia obtenido por medio de la FFT para la concentración en [ppm] del Monóxido de Carbono de 1992 a 2019 en las 5 zonas de la CDMX (h = horas, d = días, a = años).	102
Figura 8-13 Promedio diario (azul) y mensual (rojo) de la concentración histórica en [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] del Material Particulado PM_{10} de 1995 a 2019 en las 5 zonas de la CDMX.....	103
Figura 8-14 Comportamiento diario de los promedios por hora (panel superior) y comportamiento anual de los promedios mensuales (panel inferior) de la	

concentración en [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] del Material Particulado PM_{10} de 1995 a 2019 en las 5 zonas de la CDMX.....	105
Figura 8-15 Espectro de frecuencia obtenido por medio de la FFT para la concentración en [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] del Material Particulado PM_{10} de 1995 a 2019 en las 5 zonas de la CDMX (h = horas, d = días, a = años).....	107

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 3-1 Compuestos mayoritarios y minoritarios presentes en las partículas (Tomado de SEMARNAT-INE, 2011).	38
Tabla 3-2 Composición de las partículas ultrafinas, finas y gruesas (Tomado de SEMARNAT-INE, 2011).	38
Tabla 5-1 Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiental de cada contaminante y su última actualización (Tomado del Informe Anual de Calidad del Aire 2018 Ciudad de México. SEDEMA, 2020).	59
Tabla 5-2 Comparación de los valores de concentración máxima de O ₃ , CO, NO ₂ , SO ₂ y PM ₁₀ con respecto a los valores límite de la NOM, valores guía OMS y el estándar de la U.S. EPA para cada uno (Tomado del Informe anual calidad del aire 2018 Ciudad de México. SEDEMA, 2020).	60
Tabla 5-3 Obtención del Índice AIRE Y SALUD, Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud (Modificado de DOF, 2019).	61
Tabla 5-4 Índice AIRE Y SALUD (Modificado de SEDEMA, 2021c).	62
Tabla 5-5 Estaciones de monitoreo pertenecientes a la RAMA en la Ciudad de México (SEDEMA, 2021f).	66
Tabla 8-1 Zonas de la CDMX con mayor y menor concentración por contaminante.	108
Tabla 8-2 Comportamiento de los promedios diarios de los contaminantes	108
Tabla 8-3 Comportamiento de los promedios anuales de los contaminantes	109
Tabla 8-4 Componente principal del periodo por contaminante.	109

1. RESUMEN

La Ciudad de México es una de las ciudades más contaminadas del mundo debido a su orografía, sistemas naturales propios de la altitud, población y fuentes emisoras de contaminantes, además de otros factores. Mitigar la contaminación atmosférica en esta ciudad ha sido un reto, y se ha logrado mediante una serie de programas y acciones llevadas a cabo de manera conjunta entre el gobierno y la población. Si bien se han presentado algunos problemas, las concentraciones de varios de los contaminantes criterio se han reducido a lo largo del periodo de estudio, aunque, los niveles de estos aún siguen siendo un problema ambiental y de salud pública por los daños que generan.

Por los motivos expuestos anteriormente, se analizaron las series de tiempo de las concentraciones de los contaminantes Ozono (O_3), Dióxido de Azufre (SO_2), Dióxido de Nitrógeno (NO_2), Monóxido de Carbono (CO) y Material Particulado (PM_{10}), los cuales pertenecen a los contaminantes criterio, para determinar sus ciclos, periodicidad, niveles máximos y mínimos y así poder conocer a partir de esta información, por cuánto tiempo permanece cada contaminante en la CDMX. Adicionalmente se calcularon las tendencias espaciales y temporales de cada contaminante, con lo que se pudo conocer cuáles zonas presentan la mayor concentración de cada uno, además de las horas del día y los meses del año en los que se acentúa esta concentración.

Gracias al estudio se concluyó que las zonas con mayor concentración para cada contaminante son: O_3 -Suroeste, SO_2 -Noroeste, NO_2 y CO -Centro, PM_{10} -Noreste. Las zonas con menor concentración para cada contaminante son: O_3 -Centro, SO_2 -Suroeste y Sureste, NO_2 -Sureste y Noreste, CO -Suroeste, PM_{10} -Suroeste, por lo cual, la zona Suroeste es la menos contaminada en general, exceptuando que es la que presenta más ozono.

Además, se concluyó que la componente dominante en la periodicidad de las series es de: 1 día en el caso del O_3 ; 1 año para el SO_2 ; 12 horas y 1 año para el NO_2 ; 1 día y 1 año para el CO ; y 1 año para las PM_{10} .

Finalmente, se encontró una reducción en la concentración de casi todos los contaminantes, excepto las PM_{10} que presentaron un ligero aumento. Para el O_3 se tuvo una

reducción del 78% en el Noroeste, 74% en el Noreste, 80% en el Centro, 66% en el Suroeste y 66% en el Sureste. Para el SO₂ se tuvo una reducción del 45% en el Noroeste, 57% en el Noreste, 65% en el Centro, 74% en el Suroeste y 79% en el Sureste. Para el NO₂ se tuvo una reducción del 6% en el Noroeste, 20% en el Noreste, 32.2% en el Centro, 31% en el Suroeste y 24% en el Sureste. Para el CO se tuvo una reducción del 88% en el Noroeste, 73% en el Noreste, 86% en el Centro, 84% en el Suroeste y 88% en el Sureste. Y para las PM₁₀ se encontró un aumento de 8% en el Noroeste, 2% en el Noreste, 17% en el Centro, 3% en el Suroeste y 1.5% en el Sureste.

2. INTRODUCCIÓN

La Organización Mundial de la Salud (OMS) advierte que son muchos los efectos a corto y largo plazo que la contaminación atmosférica puede ejercer sobre la salud de las personas, ya que ésta aumenta el riesgo de padecer enfermedades respiratorias agudas y crónicas, enfermedades cardiovasculares y cáncer de pulmón (OMS, 2006), razón por la cual es de suma importancia hacer un estudio de la evolución espacial y temporal de los contaminantes atmosféricos en zonas altamente pobladas, para conocer la periodicidad de los mismos y los factores que influyen en su formación, lo cual ayudará para que tanto las autoridades como la población en general tomen medidas de protección más allá de las ya establecidas actualmente.

Perteneciente a la Cuenca de México y con una elevación promedio de 2,250 msnm (Jáuregui, 2004), la Ciudad de México (CDMX) se encuentra rodeada de cadenas montañosas, mismas que le confieren características particulares en la formación y dispersión de contaminantes atmosféricos. Por su ubicación geográfica, número de habitantes y problemas de movilidad derivados de la centralización de empleo, bienes, servicios y relación funcional con los estados vecinos, la CDMX presenta mala calidad del aire durante casi todo el año, poniendo en riesgo a la población que en ella vive y/o trabaja.

Desde la década de los 60 ha sido evidente la mala calidad del aire en la CDMX (Bravo-Álvarez et al., 2002), por ello desde finales de la década de los 80 se han implementado diversos programas gubernamentales con el objetivo de disminuir la emisión de contaminantes, el principal de ellos es el “Hoy no circula”, sin embargo, el riesgo de sobrepasar los niveles de contaminación establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas se encuentra latente diariamente debido al origen multifactorial de la contaminación.

El presente trabajo tiene como principal objetivo realizar un análisis de las series de tiempo de las concentraciones de los principales contaminantes atmosféricos en la CDMX utilizando los datos del Índice Aire y Salud, antes conocido como Índice Metropolitano de Calidad del Aire (IMECA), con el fin de encontrar ciclos en su comportamiento, épocas de máximos o mínimos niveles de concentración, tendencias, y un patrón geográfico de la evolución de los contaminantes en la ciudad. Lo anterior para el período comprendido entre

los años 1992 a 2019. Además, se asocian los factores limitantes en el comportamiento de los contaminantes en la zona de estudio, con la finalidad de que, aunado a los programas de gestión implementados, permita tomar decisiones encaminadas a tener un aire más limpio que garantice la calidad de vida de las personas en esta gran ciudad.

3. ANTECEDENTES

3.1 Contaminación en la Ciudad de México, inicio de la problemática actual

El proceso de transición demográfica en México que comenzó en la década de los 30 fue notablemente acelerado entre las décadas 40 y 70 debido a las reformas, la política pronatalista, oportunidades de desarrollo y la expansión económica sostenida (Zavala, 2014). Esto desencadenó una centralización de bienes, actividades económicas y servicios en la CDMX, una región sumamente pequeña en comparación con su densidad poblacional.

En los 80 la población disminuyó en la CDMX por factores limitantes como: cambios de uso de suelo habitacional a comercial, el terremoto de 1985 que provocó aproximadamente 9,089 muertos (MILENIO, 2017) y la contaminación del aire debido a los más de dos millones de vehículos automotores que operaban en el Valle de México sin ninguna restricción de emisión de contaminantes (NEXOS, 2016). En este momento ya se habían puesto en manifiesto las implicaciones que tenía respirar aire contaminado y que dicha situación iba en aumento, aun así, la CDMX siguió creciendo desordenadamente (Jáuregui, 1995). A décadas del origen del problema de la contaminación atmosférica en la CDMX, la mancha urbana se apropia cada vez más de suelos de conservación y las actividades diarias e industriales siguen perpetuando la mala calidad del aire, a pesar de que la contaminación en la CDMX desde finales de los 70 ya era “una de las más críticas en el mundo” (Soto, 2017).

Aunado a las condiciones naturales de la ciudad, por pertenecer a la Cuenca de México, la vulnerabilidad de los habitantes a respirar un aire contaminado aumenta si consideramos que el consumo energético se vuelve cada vez mayor, generando contaminación lumínica, sonora, ambiental y emisiones de gases contaminantes, además de los problemas de movilidad derivados de la falta de planeación urbana y mantenimiento, lo cual aumenta la generación de contaminantes por fuentes móviles.

3.2 Principales contaminantes atmosféricos, porcentaje de emisión y sus efectos en la salud humana

Los Sistemas de Monitoreo de la Calidad del Aire se han convertido en una herramienta útil para el conocimiento del estado en tiempo real de la atmósfera y la calidad del aire, con ello es posible saber cuáles son los principales contaminantes atmosféricos, sus fuentes de emisión y el impacto negativo que tienen a corto y largo plazo. Los contaminantes atmosféricos considerados en este trabajo son algunos de los contaminantes criterio, aquellos que están regulados por las Normas Oficiales Mexicanas: Ozono (O_3), Dióxido de Azufre (SO_2), Dióxido de Nitrógeno (NO_2), Monóxido de Carbono (CO) y Material Particulado (PM_{10}) (Fig. 3-1).

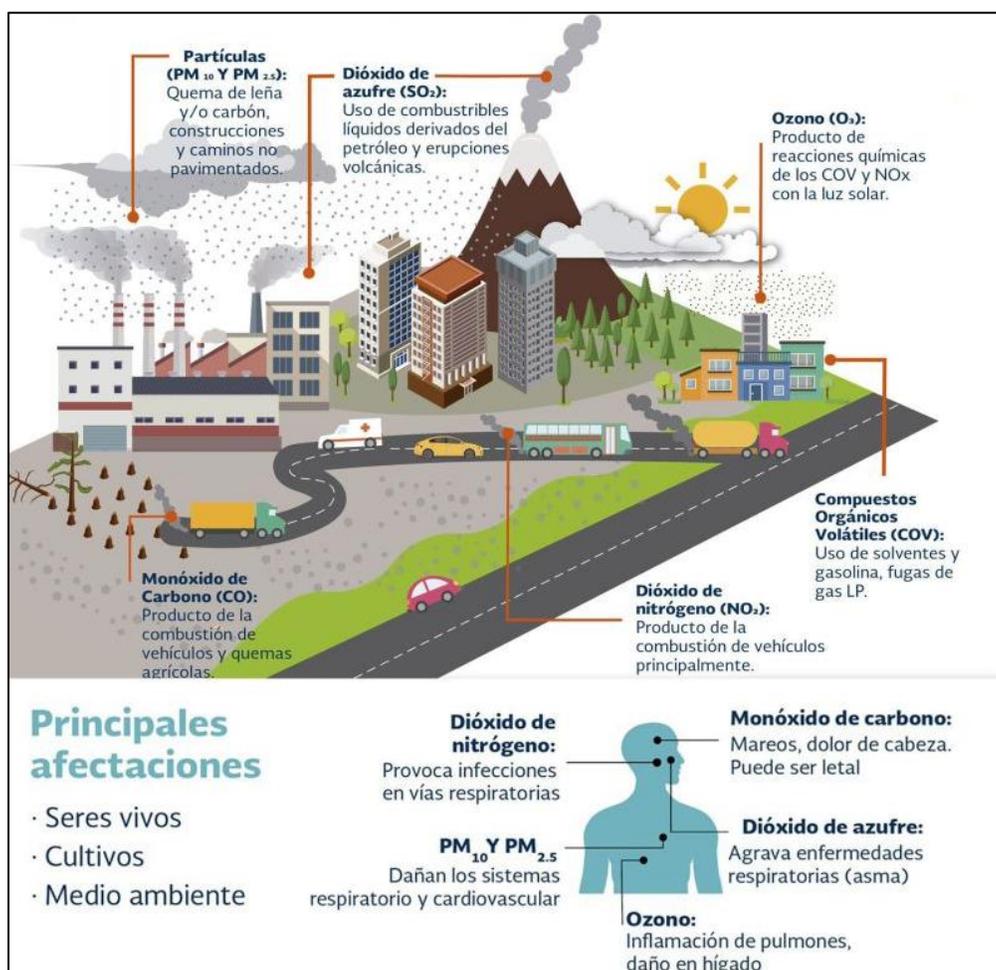


Figura 3-1 Principales contaminantes atmosféricos, sus fuentes de emisión y sus efectos en la salud humana (Modificado de UAP, 2021).

Las fuentes emisoras, las actividades o sectores capaces de producir contaminación en la Ciudad de México son muy diversas y van desde actividades al aire libre como realizar una fogata, hasta actividades industriales. En el Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) 2018 (SEDEMA, 2021a) se reconocen las fuentes emisoras y los sectores que aportan un porcentaje considerable de contaminantes a la atmósfera. Las fuentes emisoras se clasifican como (SEDEMA, 2021a; SEMARNAT, 2018):

- Fuentes puntuales o fijas: se caracterizan porque se encuentran en un punto fijo de la ciudad, como plantas de energía, refinerías, industrias y son las que emiten contaminación por la quema de combustibles fósiles, por procesos productivos en los que está inmersa la transformación física o química de materiales y por el uso de productos (por ejemplo, solventes, grasas, lubricantes).
- Fuentes móviles: son las que consideran a todo el medio de transporte como autos, autobuses, motocicletas, tractocamiones, microbuses, etc.
- Fuentes de área: son todas aquellas actividades que conjuntamente son capaces de afectar la calidad del aire, como las tintorerías, actividades agrícolas, restaurantes, madererías, actividades domésticas, quema a cielo abierto, aguas residuales no tratadas, rellenos sanitarios, uso comercial y domestico de solventes, actividades de construcción, agricultura, ganadería, asados, esterilización de hospitales, incendios, ladrilleras, panaderías, así como distribución, fugas y almacenamiento de combustibles, etc.
- Fuentes naturales o biogénicas: son los procesos y fenómenos naturales que generan contaminación al aire como actividad volcánica, erosión, procesos costeros o marinos.

De acuerdo con el “Programa para mejorar la calidad del aire de la ZMVM 2011-2020” (CAME, 2011), existen dos factores fundamentales para establecer la capacidad de un contaminante para producir un efecto sobre la salud:

- I. La magnitud de la exposición, la cual está en función de la concentración del contaminante, duración y frecuencia de la exposición.

- II. La vulnerabilidad de las personas expuestas, que se ve reflejado en ciertos grupos de población que son más sensibles y depende de factores intrínsecos como la genética, etnia, género y edad, así como factores adquiridos tales como condiciones médicas, acceso a los servicios de salud y nutrición.

Kampa y Castanas (2008) señalan que para determinar si una sustancia representa un riesgo para la salud de las personas o no, se deben realizar estudios clínicos, epidemiológicos y en animales que demuestren si la exposición a una sustancia está asociada con efectos sobre la salud y con estos se estime la probabilidad de riesgo de que estos sean nocivos, y agregan que los efectos se pueden clasificar como efectos agudos o crónicos, sin incluir al cáncer y efectos cancerígenos. De acuerdo con CAME (2011) se caracterizan como:

- Los agudos se deben a concentraciones grandes de contaminantes en corto periodo de tiempo, los cuales causan daños sistémicos al cuerpo.
- Los crónicos se deben a concentraciones bajas de los contaminantes, pero durante un periodo de tiempo largo, mismos que pueden afectar a las personas cuya disposición genética y problemas de salud los vuelva vulnerables.

Es necesario aclarar que los efectos en la salud de las personas ejercidos por los contaminantes dependen del tiempo de exposición a ella, grado de contaminación, tipo de contaminantes, edad y salud intrínseca de las personas, condiciones y lugar de vivienda, así como del trabajo, entre otros aspectos. Por esta razón, los efectos en la salud para cada contaminante presentados en las siguientes subsecciones son los más comunes y reúnen la información de estudios realizados nacional e internacionalmente de manera resumida.

3.2.1 Ozono (O₃)

3.2.1.1 Génesis del contaminante

El Ozono es un Contaminante Climático de Vida Corta (CCVC), pero tiene efectos muy importantes sobre el clima, además forma parte de los Gases de Efecto Invernadero (GEI's), de los contaminantes criterio (INECC, 2018) y del smog fotoquímico presente en las grandes ciudades como la CDMX, Londres y Los Ángeles (Jacobson, 2012).

El Ozono se forma de manera natural en la estratósfera mediante el Ciclo de Chapman, gracias al oxígeno atómico y al oxígeno molecular generado por la fotólisis. Dicho ciclo incluye la formación y destrucción del Ozono estratosférico en una porción de 300,000 toneladas diarias, allí el Ozono funge como una barrera natural de los rayos UVB y UVC emitidos por el Sol, cuyo poder de penetración podría alterar el ADN y provocar quemaduras severas en el tejido de los seres vivos, brindando así una protección imprescindible para la vida en la Tierra (Velázquez y Jiménez, 2007).

En la tropósfera, el ozono se forma mediante la emisión de contaminantes primarios por medio de reacciones fotoquímicas complejas (Jaimes-López et al., 2010), sus principales precursores son los Óxidos de Nitrógeno (NO_x) y los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) (Nuvolone et al., 2018) (Fig. 3-2). El Ozono como contaminante en esta región tiene un fuerte carácter oxidante, corrosivo y tóxico (Contreras et al., 2013), es incoloro, aunque en grandes concentraciones toma un color púrpura, tiene un olor característico metálico y picante una vez que excede las 20 ppb, además es una especie reactiva que contribuye al efecto invernadero, afecta el rendimiento de las cosechas, el crecimiento de plantas y también produce afecciones respiratorias (SEDEMA, 2020).

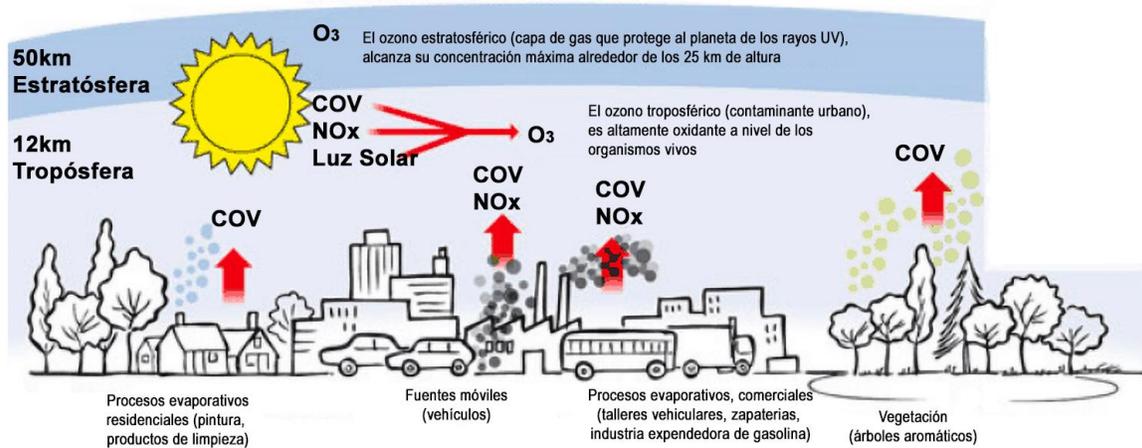
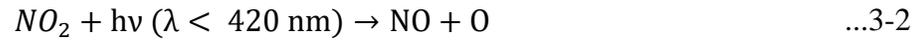


Figura 3-2 Esquema de la contaminación atmosférica por Ozono (Modificado de METEORED, 2022).

Aunque en teoría, la concentración del Ozono debe ser menor en la noche dado que el proceso de formación del Ozono cesa conforme el sol se oculta y la dispersión junto con las reacciones químicas facilitan tal comportamiento. En la CDMX ha mostrado un comportamiento diferente, pues la concentración llega a alcanzar valores relativamente altos, sobre todo en las estaciones de monitoreo que se encuentran a mayor altitud, lo cual puede tener relación con el remanente de Ozono en las capas nocturna y residual, es decir, en la capa residual el Ozono experimenta un menor agotamiento químico que en la capa nocturna, como resultado, al Ozono que está presente durante la noche se le denomina concentración de fondo (SEDEMA, 2017).

De manera simplificada, la relación de mezcla del Ozono en la troposfera de fondo está controlada por tres reacciones, cuyos reactivos principales son el NO y el NO₂ (compuesto gaseoso que, mediante un proceso fotoquímico, forma directamente Ozono), sin considerar las reacciones llevadas a cabo mediante los demás precursores éstas serían (Jacobson, 2012):



donde M es una molécula catalizadora que acompaña la colisión y que no se afecta por la reacción.

De forma natural y en ambientes limpios la concentración de fondo está entre 20 - 40 ppb a nivel del mar y entre 30 - 70 ppb a mayor altitud (SEDEMA, 2020), aunque en atmósferas urbanas la concentración aumenta debido a la emisión de precursores (SEDEMA, 2017).

Los procesos de reducción del Ozono son la fotólisis, reacciones atmosféricas en fase gaseosa y sobre superficies, disolución en agua, depositación en hielo, nieve, suelo, vegetación, así como estructuras (SEDEMA, 2020).

3.2.1.2 Porcentajes de emisión

➤ Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)

Las principales fuentes de emisión de los COV están asociadas a las actividades mismas de la población, relacionadas con la alta demanda de servicios, movilidad y actividades de combustión, además del uso de solventes en comercios e industrias. Es importante mencionar que en México no existe una normatividad regulatoria para el contenido de COV en productos de uso industrial, comercial ni doméstico, por ejemplo, plaguicidas, limpiadores, productos de cuidado personal, etc. (SEDEMA, 2018a). En 2018 en la Ciudad de México se emitieron 166,413 toneladas de COV de las cuales el 66.7% provino de fuentes de área, 23.2% provino de fuentes móviles, 6.3% de fuentes puntuales y el 3.8% de fuentes naturales (SEDEMA, 2021a).

Espacialmente y considerando que el aporte de COV proviene de actividades de la población, en la CDMX la distribución se encuentra mayoritariamente en delegaciones cuya densidad poblacional y tráfico vehicular es mayor, de tal forma que las manchas de emisión más intensas se sitúan en toda la parte Norte, Noreste y Centro de la ciudad, mientras que la zona Sur es la que menos aportes tiene. Además, en las delegaciones Gustavo A. Madero, Venustiano Carranza, Iztapalapa y Xochimilco hay aportes por actividades industriales de tipo químico y de impresión, mientras que en la zona centro las emisiones provienen de comercios y servicios (SEDEMA, 2021a).

➤ Óxidos de Nitrógeno (NOx)

Se mencionan en la sección del Dióxido de Nitrógeno.

3.2.1.3 Efectos en la salud humana

El órgano más afectado al inhalar Ozono es el pulmón (Riojas et al., 2009). Nuvolone et al. (2018) mencionan que el Ozono, por ser poco soluble en agua, una vez que ingresa al sistema respiratorio no es eliminado eficazmente por el tracto superior, es decir que la mayor parte llega al tracto inferior (donde se genera el intercambio gaseoso) y se disuelve en la capa delgada de fluido de revestimiento epitelial, el cual comprende una mezcla compleja de proteínas, lípidos y antioxidantes que fungen como protección contra patógenos y sustancias extrañas en el cuerpo. Posteriormente a la entrada de Ozono, éste reacciona con los componentes del revestimiento, formando productos de oxidación secundaria mismos que son los causantes de la inflamación sufrida luego de la exposición al Ozono, así, el estrés oxidativo inducido por los productos de oxidación secundaria (cuando aumenta la concentración de radicales libres, debido a una defensa del organismo ante una exposición ambiental) puede causar daño celular en el tracto respiratorio. Este es el mecanismo celular por el cual la mayoría de los contaminantes atmosféricos ejercen efectos en la salud, es decir, por su capacidad de actuar directamente como oxidantes de lípidos y proteínas o como generadores de radicales libres, promoviendo estrés oxidativo (Riojas et al., 2009).

Los síntomas respiratorios que provoca son tos, flemas, sibilancia, lo cual puede agravar el asma, enfisema y cáncer pulmonar, aunado a esto, la inhalación puede causar irritación en los ojos, nariz y garganta, así como dificultades asociadas con la inhalación profunda (Nigenda et al., 2002; Riojas et al., 2009).

- Una exposición crónica al Ozono puede causar fibrosis local y una reducción en la función pulmonar, suprimir las respuestas inmunes locales y sistémicas (Riojas et al. 2009).
- Una exposición prolongada a contaminantes ambientales (O_3 , PM_{10} y NO_2) está asociada con déficits en el crecimiento pulmonar de los niños en la Ciudad de México, enfermedad obstructiva pulmonar crónica (EPOC), infarto agudo de miocardio (Rojas-Martínez et al. 2007) y, según Nigenda et al (2002), accidentes vasculares encefálicos. Aunado a esto, las personas con enfermedad pulmonar preexistente, como bronquitis crónica, asma o enfisema muestran un mayor riesgo de efectos sobre la salud relacionados con el Ozono (Nuvolone et al., 2018).

- Una exposición aguda está asociada a una capacidad vital forzada reducida y un volumen respiratorio forzado, además altera las funciones de los macrófagos, lo cual podría estar aumentando la susceptibilidad a las infecciones respiratorias, bronquitis aguda en adultos mayores y niños, síntomas alérgicos y mortalidad prematura (Nigenda et al., 2002).

Los estudios de los efectos de tipo morbilidad demuestran que el Ozono ocasiona un incremento del ausentismo escolar por causas respiratorias (Nigenda et al., 2002), días de actividad restringida, ingresos hospitalarios, ataques de asma, sinusitis crónica, además, puede generar efectos extrapulmonares, por ejemplo, cambios en la estructura y función de los órganos y enfermedades crónicas como la bronquitis (Ferrer y Escalante, 2009). También existe evidencia de la mortalidad asociada a concentraciones de Ozono, los estudios de series cronológicas indican un aumento de la mortalidad diaria que va de 0.3-0.5% por cada incremento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ó 0.005 ppm en las concentraciones de Ozono durante ocho horas por encima de un nivel de referencia estimado de $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (OMS, 2006). Jerrett et al., (2009) muestran en un estudio de exposición prolongada (18 años) que el Ozono tiene una relación con la muerte por causas respiratorias, aproximadamente un 2.9% por cada aumento de 10 ppb en la exposición, lo cual es consistente con Bell et al. (2005), pues encontraron para adultos mayores, una relación importante entre la mortalidad cardiovascular y respiratoria por exposición a Ozono.

3.2.2 Dióxido de Azufre (SO₂)

3.2.2.1 Génesis del contaminante

El Dióxido de Azufre es un gas compuesto de un átomo de azufre y dos de oxígeno, es incoloro, no es inflamable ni explosivo, tiene un olor que es notorio cuando la concentración supera los 300 ppb, mismo que se agudiza cuando llega a 500 ppb, es irritante, muy estable (SEDEMA, 2020) y soluble en agua, lo cual hace que forme ácido sulfúrico (H₂SO₄) (Fig. 3-3), pues reacciona con ella, con el oxígeno del aire y los radicales hidroxilos (SEDEMA, 2021a). Este ácido es un componente de los aerosoles que afecta la depositación de la lluvia al volverla ácida, además afecta el clima a nivel global y contribuye al deterioro de la capa de Ozono (SEDEMA, 2020). Durante su proceso de oxidación en la atmósfera forma sulfatos los cuales conforman al material particulado PM₁₀ y en presencia de humedad forma ácidos en forma de aerosoles produciendo así una parte del material particulado fino PM_{2.5} (SEDEMA, 2020).

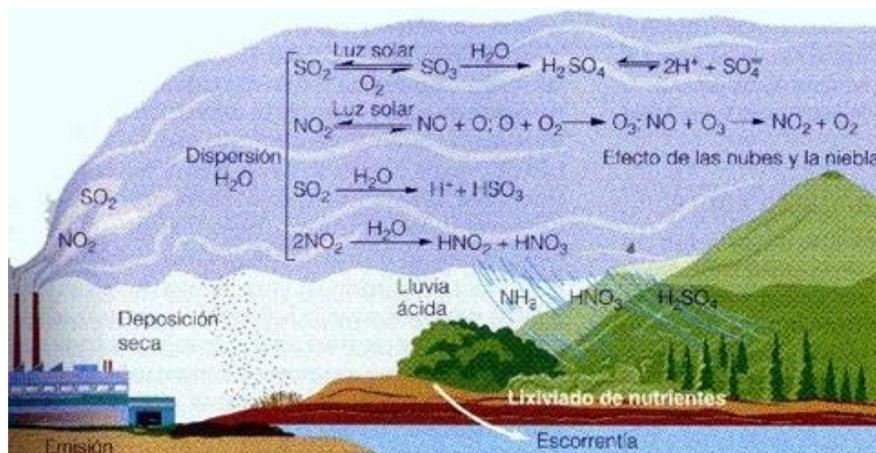


Figura 3-3 Reacciones químicas en la atmósfera del Dióxido de Azufre y Dióxido de Nitrógeno (Todoesquímica, 2022).

En la CDMX la mayor fuente de SO₂ son las fuentes regionales; el corredor industrial Tula-Vito-Apasco, la quema de combustibles fósiles, la industria química y la refinería y la termoeléctrica de Tula (SEDEMA, 2021a). La concentración de fondo de SO₂ en la troposfera está entre 10 ppt² a 1 ppb y en aire contaminado va de 1 a 30 ppb, por otro lado, la remoción puede ser vía química mediante una reacción en la atmósfera para formar el ácido sulfúrico, vía disolución en agua por medio de nubes y agua superficial o bien, vía depositación en hielo, nieve, suelo, vegetación y superficie de estructuras (SEDEMA, 2021a).

3.2.2.2 Porcentajes de emisión

En 2018 en la Ciudad de México se emitieron 902.3 toneladas de SO₂, de las cuales el 51.3% proviene de fuentes de área, el 10.2% de fuentes fijas, el 38.5% de fuentes móviles y ningún aporte de fuentes naturales (SEDEMA, 2021a). Las principales fuentes de emisión son la quema de combustible fósil como petróleo, carbón, gas natural o LP, los procesos de refinación del petróleo, procesos de producción del ácido sulfúrico, fundición de minerales como plomo, zinc, cobre y las fuentes móviles que utilizan Diesel como combustible pues contiene azufre en pequeñas cantidades, aunque se mencionó anteriormente que no hay aportes por fuentes naturales en la Ciudad de México, una de ellas podría ser el volcán Popocatepetl aunque su aporte no es significativo (SEDEMA, 2021a).

3.2.2.3 Efectos en la salud humana

El Dióxido de Azufre y la contaminación por partículas son emitidos en conjunto por fuentes de combustión y están íntimamente ligados tras ser componentes de una mezcla compleja (CEOHAATS, 1996), es decir, si una pequeña fracción se une al material particulado fino será inhalado y llegará a las vías respiratorias inferiores, si esto no ocurre será absorbido sólo por las vías superiores debido a que es muy soluble en agua (Riojas et al., 2009). Tras una exposición elevada a este contaminante los síntomas son tos, irritación en la nariz y garganta, broncoconstricción y disnea (CAME, 2011). Tales síntomas se agravan si la exposición ocurre tras alguna actividad física (Riojas et al., 2009), los grupos más vulnerables suelen ser los niños asmáticos (Nigenda et al., 2002), además se ha demostrado que la inhalación de ácido sulfúrico altera las defensas contra las enfermedades respiratorias agudas (Spengler y Wilson, 1996).

3.2.3 Dióxido de Nitrógeno (NO₂)

3.2.3.1 Génesis del contaminante

El Dióxido de Nitrógeno (NO₂) es un compuesto químico gaseoso conformado por un átomo de nitrógeno y dos de oxígeno (pertenecce al grupo de los NO_x). Es un gas tóxico de coloración marrón- amarillento, irritante y oxidante, funciona como intermediario entre la emisión del NO y la formación del Ozono (Fig. 3-3), es precursor del ácido nítrico y en su forma natural reduce el Ozono en la estratósfera (SEDEMA, 2020). A nivel mundial, las mayores fuentes de emisión del NO₂ son el tráfico, seguido de la industria, el transporte marítimo y los hogares (WHO, 2005), pues se emite por la oxidación del NO, la quema de combustible fósil, biocombustible y biomasa, calentadores de queroseno, estufas que usan madera o gas LP y el cigarro. La concentración de fondo en la capa superior atmosférica va de 30 a 70 ppt y en regiones urbanas va de 50 a 250 ppb, por otro lado, en interiores sin ventilación y como consecuencia de cocinar con gas o calentadores de gas, va de 20 a 50 ppb con picos de 400 a 1000 ppb, lo cual resulta ser bastante alarmante ya que se ha estimado que la exposición desde 300 a 800 ppb reduce la capacidad pulmonar aproximadamente un 10% (SEDEMA, 2020).

El Monóxido de Nitrógeno (NO) es un gas incoloro, poco soluble en agua además de ser un radical libre, es emitido por microorganismos del suelo y plantas, incendios forestales, actividad volcánica, descargas eléctricas atmosféricas, descomposición del nitrito (NO₂⁻), oxidación del amoníaco (NH₃) y procesos fotoquímicos en los océanos y algunas plantas, además de procesos de combustión a altas temperaturas (SEDEMA, 2020). Es precursor del ácido nítrico HNO₃, el Ozono troposférico y del nitrato en partículas NO₃ y en su forma natural al igual que el NO₂, reduce el Ozono en la estratósfera (SEDEMA, 2020). La concentración de fondo es de 5 ppt, mientras que en las capas superiores esta entre 20 a 60 ppt, sin embargo, en regiones urbanas puede llegar hasta 1000 ppb en las primeras horas de la mañana e ir decreciendo hasta cero por las reacciones con el Ozono cuando es medio día (SEDEMA, 2018a; SEDEMA, 2020).

La reducción del NO y NO₂ se presenta a través de las reacciones químicas atmosféricas, disolución en el agua y depositación en el hielo, nieve, suelo, vegetación y

estructuras (SEDEMA, 2020). Concretamente, los NO_x, que son un grupo de compuestos químicos gaseosos formados por la combinación de oxígeno y nitrógeno (funcionan como precursores del Ozono) son la suma de NO y NO₂, del 70 al 90% de concentración es el NO mientras que el NO₂ está en una proporción aproximada de 10 a 30% (SEDEMA, 2020).

3.2.3.2 Porcentajes de emisión

El aporte de este precursor depende especialmente de la relación aire-combustible en los motores, generándose cuando ingresa mucho aire y poco combustible en el motor de los medios de transporte, por ello la tecnología en los vehículos ha ido evolucionando, por ejemplo, actualmente se utilizan los convertidores catalíticos cuya función es convertir estos contaminantes en emisiones menos dañinas antes de salir del escape (SEDEMA 2018a).

En 2018, se emitieron 51,543 toneladas de NO_x, de las cuales el 86.4% provienen de fuentes móviles, siendo la mayor fuente de este porcentaje los vehículos que ocupan Diesel (aun cuando representan solamente el 6% de la flota total de la ciudad) aportando el 38% de los NO_x, el 10.5% proviene de fuentes de área, el 3% de fuentes puntuales y el 0.1% de fuentes naturales (SEDEMA, 2021a).

Espacialmente, la distribución en la CDMX es congruente con las principales vialidades, particularmente en el Centro, Noreste, Norte y Noroeste; en Azcapotzalco y Cuauhtémoc las contribuciones son principalmente por actividades industriales, en Iztapalapa por la generación de energía eléctrica, en Gustavo A. Madero por la fabricación de fibra de vidrio, y en Venustiano Carranza se atribuyen a las generadas por el Aeropuerto Internacional “Benito Juárez” (SEDEMA, 2021a).

3.2.3.3 Efectos en la salud humana

El NO₂ es poco soluble, irritante y oxidante, su capacidad de penetrar los bronquiolos y alveolos lo vuelve peligroso (Riojas et al., 2009). Luego de su exposición los síntomas que suelen presentarse son irritación en nariz y garganta, broncoconstricción y disnea, especialmente en personas asmáticas, además incrementa la susceptibilidad a infecciones respiratorias (Kampa y Castanas, 2008). En 2007 se comprobó la asociación del déficit del crecimiento de la función pulmonar y la exposición crónica a contaminantes, sobre todo O₃, PM₁₀ y NO₂ en un estudio realizado con niños en la ZMVM (Rojas-Martinez et al., 2007).

3.2.4 Monóxido de Carbono (CO)

3.2.4.1 Génesis del contaminante

El Monóxido de Carbono contiene un átomo de oxígeno y uno de carbono, es un gas inodoro, incoloro, no inflamable, inerte, no irritante, altamente tóxico (según su concentración y tiempo de exposición) (SEDEMA, 2020) y es precursor del Ozono (Fig. 3-4).

Como los contaminantes tienen la capacidad de reaccionar químicamente entre sí es precursor de un gas de efecto invernadero (Riveros et al., 1995). Después de su formación durante un periodo de tiempo de alrededor de 3 meses, reacciona con el O_2 pasando a ser CO_2 (SEDEMA, 2020).

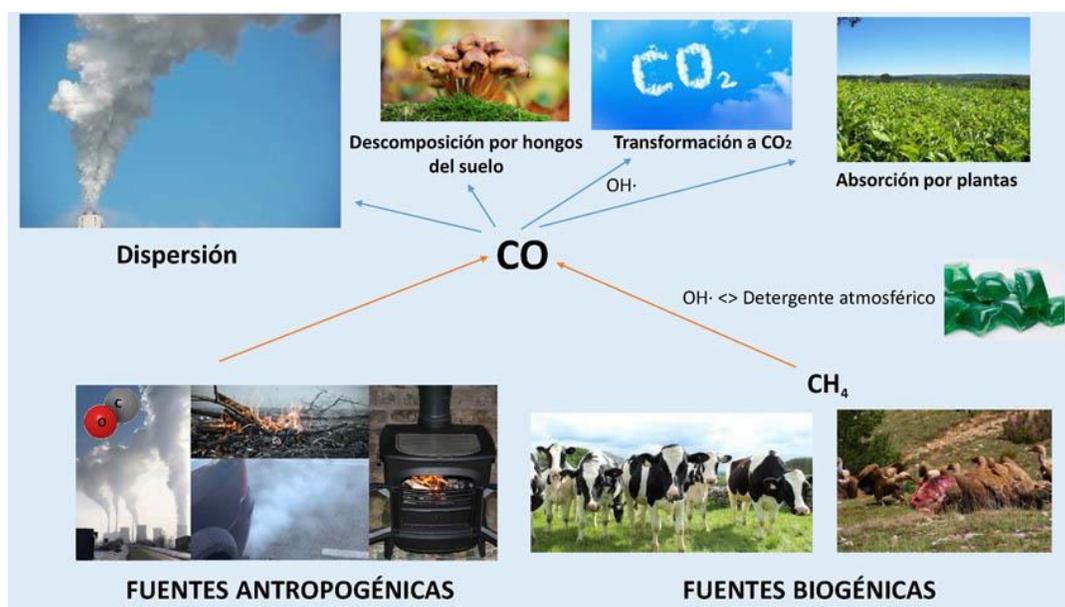


Figura 3-4 Esquema de las fuentes y evolución del Monóxido de Carbono (CO) en la atmósfera (RETEMA, 2018)

Es el gas contaminante más abundante en las atmósferas urbanas (Jáuregui, 1984) como lo es la CDMX, esto debido a la gran flota vehicular en ella, ya que es emitido mediante la combustión incompleta de sustancias como la gasolina, el gas, queroseno, madera, carbón, entre otros (SEDEMA, 2020). Le sigue en importancia de emisión las fuentes estacionarias, principalmente de procesos industriales (mediante procesos oxidativos para la obtención de sustancias químicas), también existen fuentes naturales de emisión (que no son tan significativas) como lo son la actividad volcánica, las tormentas eléctricas, y los incendios forestales sobre todo en temporada de secas (Jáuregui, 1984).

La concentración de fondo de este contaminante en la tropósfera está en un rango entre 50 a 150 ppb y su tiempo de vida suele ser de 30 a 90 días. La concentración en el interior de una casa al encender una estufa puede llegar alcanzar entre 6 y 12 ppm, que es incluso mayor que la que hay cerca de vialidades muy transitadas, pues esta está entre 2 a 10 ppm. La remoción de esta sustancia se da mediante la lluvia o vía depositación en hielo, suelo, nieve, vegetación y superficies de estructuras (SEDEMA, 2020).

3.2.4.2 Porcentajes de emisión

En 2018 en la Ciudad de México se emitieron 276,217.8 toneladas de las cuales el 96.8% proviene de fuentes móviles por lo que el principal emisor es el sector del transporte, el 2.8% de fuentes de área y lo restante de fuentes fijas (SEDEMA, 2021a). Lo cual indica que las emisiones provienen casi al 100% del transporte que se utiliza en la ciudad.

3.2.4.3 Efectos en la salud humana

La sangre consiste de una parte líquida (plasma) la cual transporta proteínas, nutrientes y electrolitos y una parte sólida (celular) compuesta por glóbulos blancos que combaten infecciones; plaquetas que facilitan la cicatrización mediante los coágulos que generan en la sangre y glóbulos rojos que transportan oxígeno y dióxido de carbono (Badman y Jeffé, 1996), sin embargo, una vez que el CO ingresa en el cuerpo entra fácilmente a la sangre uniéndose aproximadamente entre 200-300 veces más a la hemoglobina que el oxígeno, formando carboxihemoglobina (COHB) lo cual inhibe la capacidad de transporte de oxígeno (Badman y Jeffé, 1996; Bolaños y Chacón, 2017; Fleta et al., 2005; Riojas et al., 2009; Thom, 2002).

La intoxicación con este contaminante es muy común, más de la mitad de todas las intoxicaciones fatales reportadas en todo el mundo son por CO (Raub et al. 2000) dado que todas las personas están expuestas a este contaminante en distintos niveles ya que permanece en la atmósfera varios meses hasta convertirse en CO₂ (ATSDR, 2012). Además, al emitirse por la combustión del tabaco representa un grave riesgo pues aproximadamente 1.9 millones de ciudadanos en la CDMX que tienen entre 12 a 65 años son fumadores (INPRFM, 2017), aunado a que en interiores también está presente en altas concentraciones, sobre todo por el uso de la estufa. Es de esperarse entonces que la exposición a este contaminante sea sumamente peligrosa pues las personas no suelen darse cuenta de su presencia, tal es así que es llamado el asesino silencioso (Fleta et al., 2005).

- La exposición leve puede causar hipoxia tisular (Badman y Jeffé, 1996), que es la deficiencia de oxígeno indispensable en las necesidades fisiológicas y, por lo tanto, estimular la formación de glóbulos rojos (Torres-Ramos et al., 2009).
- Una exposición aguda puede manifestarse con síntomas leves o inespecíficos como cefalea, vértigo, náuseas, vómitos, sueño, fatiga, alteraciones visuales, dolor torácico y debilidad muscular (Fleta et al., 2005), también se han encontrado efectos importantes en niños, efectos perinatales y efectos de comportamiento neurológico (Nigenda et al., 2002).
- La exposición aguda severa puede provocar muerte por asfixia o daño permanente al sistema nervioso central (Badman y Jeffé, 1996).

- Una exposición crónica provoca lesiones cerebrales por anoxia; deterioro intelectual; convulsiones; trastornos de la memoria y sensoriales; a embarazadas, sobre todo por tabaquismo materno puede afectar al feto directamente debido a que la hemoglobina fetal es más afín al CO que la del adulto, es decir, niveles de CO no tóxicos en adultos pueden generar hipoxia (Bolaños y Chacón, 2017) y daños en el sistema central nervioso en el feto, causándoles peso reducido al nacer y un desarrollo postnatal retrasado (Nigenda et al., 2002).

Las anomalías neurológicas y la pérdida del conocimiento son las principales características para definir la intoxicación grave por monóxido de carbono (Thom, 2002), sin embargo, síntomas importantes aparecen desde 10% de COHB, mientras que de 50 a 60 % es muy probable caer en coma y arriba de 60% tener un paro respiratorio y muerte (Sibón et al., 2007).

3.2.5 Materia particulada PM₁₀

3.2.5.1 Génesis del contaminante

Las partículas o aerosoles atmosféricos, formados a partir de fuentes naturales o antropogénicas son una mezcla de partículas sólidas o líquidas suspendidas en el aire, con diámetros que van desde nanómetros hasta micrómetros (Li et al., 2011).

Debido a que la naturaleza de la fuente es determinante tanto para las propiedades físicas como para la composición química de las partículas, éstas se pueden clasificar como primarias (si se emiten directamente a la atmósfera por diversas fuentes) o secundarias (si se forman en la atmósfera como resultado de reacciones químicas por medio de materiales gaseosos llamados precursores) (EC, 2004) que luego continúan experimentando una transformación química y física en la atmósfera (WHO, 2005).

Además de la clasificación anterior, para propósitos regulatorios las partículas se clasifican según su tamaño, utilizando así el diámetro aerodinámico, tal indicador es igual al diámetro de una partícula esférica de densidad unitaria que tiene la misma velocidad terminal que la partícula considerada, ya que no tienen una forma específica (WHO, 2005). Por tales motivos se caracterizan en tres grupos:

1. Las partículas gruesas (PM₁₀): miden más 2.5 µm y menos de 10 µm de diámetro aerodinámico y se les llama fracción respirable, ya que por su tamaño tienen la capacidad de entrar en la región torácica, la mayoría se producen mediante procesos mecánicos, por ruptura de partículas sólidas más grandes.
2. Las partículas finas (PM_{2.5}): miden menos de 2.5 µm de diámetro aerodinámico lo cual les permite depositarse en las vías respiratorias y alvéolos, se producen mayoritariamente a partir de gases, aunque también por procesos de combustión.
3. Las partículas ultrafinas: son de 0.1 µm (100 nm).

En resumen, la suma de partículas ultrafinas y finas son conocidas como PM_{2.5}, la suma de todas las partículas menores a 10 µm de diámetro son las PM₁₀. Es decir, las PM₁₀

incluyen la contribución de PM_{2.5} y PM_{1.0}. En la Ciudad de México del total de las PM₁₀ el 52% corresponde a PM_{2.5} y el 48% a PM_{10-2.5} (SEDEMA, 2020).

Es notable entonces que el tamaño es una de las propiedades más importantes ya que es un determinante crítico de la probabilidad y el sitio de deposición dentro del tracto respiratorio y los riesgos asociados con grupos de tamaño específicos, determina los procesos de transporte y eliminación en el aire, así como su depositación y vida útil (WHO, 2005).

En tal sentido, el proceso de remoción de las partículas gruesas suele ser mediante sedimentación y precipitación; las partículas cuyo tamaño es mayor a 20 µm pueden permanecer suspendidas en la atmósfera varias horas; a diferencia de las partículas cuyo tamaño es de 2 y 3 µm pues suelen tener un tiempo de vida de 2 a 4 días y su proceso de remoción suele ser la precipitación; por último, las partículas en el rango de 0.1-1 µm suelen tener un tiempo de vida más largo, desde días hasta pocas semanas, además pueden ser núcleos de condensación de nubes cuya capacidad de precipitación es alta, por lo que se considera que el tiempo de vida es similar al tiempo de residencia del agua de 10 días (EC, 2004).

No sólo el tamaño afecta el tiempo de residencia de las partículas en la atmósfera, también lo hacen sus propiedades termodinámicas, mismas que dependen de la temperatura y humedad, por lo tanto, especies como nitrato de amonio y algunos aerosoles orgánicos no son estables ante cambios de estas variables y las concentraciones de estas especies pueden variar en verano (suele haber niveles más bajos) e invierno (suele haber niveles más altos) (EC, 2004).

Las partículas no tienen una forma específica dado su origen y composición, esto es una característica muy importante de este contaminante ya que determina sus propiedades ópticas que, eventualmente, las convierte en forzantes radiativos. Durante la campaña de campo del Área Metropolitana de la Ciudad de México (MCMA-2006) como parte del proyecto “MILAGRO”, se encontró que la Ciudad de México tiene altos niveles de aerosoles finos que absorben la radiación solar. Aunado a ello, la dispersión o absorción de una fracción de la radiación solar también afecta las tasas de fotólisis en la atmósfera (el impacto dependerá de la carga de aerosoles), lo que afecta la formación de Ozono y la capacidad de oxidación atmosférica (Li et al., 2011).

Resumiendo, en la Tabla 3-1 se presentan los compuestos mayoritarios y minoritarios presentes en las partículas, de la misma forma, en la Tabla 3-2 se presenta la composición de las partículas de acuerdo con su tamaño.

Tabla 3-1 Compuestos mayoritarios y minoritarios presentes en las partículas (Tomado de SEMARNAT-INE, 2011).

Compuestos mayoritarios	Compuestos minoritarios
<ul style="list-style-type: none"> • Sulfatos (SO₄) • Nitratos (NO₃) • Amonio (NH₄) • Sodio y cloro (Na y Cl) • Carbón elemental • Carbón o Aerosol orgánicos secundario (SOA) • Componentes minerales Fe₂, O₃, Ca, Si y Al • Agua 	<ul style="list-style-type: none"> • Elementos traza: metales como: plomo (Pb), cadmio (Cd), mercurio (Hg), níquel (Ni), cromo (Cr), zinc (Zn) y magnesio (Mg), etc. • Compuestos orgánicos: hidrocarburos aromáticos, HAP, alifáticos, aldehídos, ácidos carboxílicos y cetonas, entre otros

Tabla 3-2 Composición de las partículas ultrafinas, finas y gruesas (Tomado de SEMARNAT-INE, 2011).

Gruesas (PM _{2.5} -PM ₁₀)	Finas (≤ PM _{2.5})	Ultrafinas (PM _{0.1})
<ul style="list-style-type: none"> • Nitratos, cloruros, sulfatos de reacciones de HNO₃, HCl y SO₂ con partículas gruesas • Óxidos de elementos de la corteza terrestre (Si, Al, Ti, Fe) • CaCO₃, CaSO₄, NaCl, sal marina • Bacterias, polen, moho, esporas de hongos, detritos de plantas y animales 	<ul style="list-style-type: none"> • Sulfato, nitrato, amonio, iones de hidrógeno • Carbón elemental • Gran variedad de compuestos orgánicos • Metales: compuestos de Pb, Cd, V, Ni, Cu, Zn, Mn, Fe, etc. • Agua ligada a las partículas, bacterias, virus 	<ul style="list-style-type: none"> • Sulfato • Carbón elemental • Compuestos metálicos • Compuestos orgánicos con baja saturación de presión de vapor a temperatura ambiente

Para finalizar, otra característica de su comportamiento es que la proporción entre la fracción gruesa y fina de las partículas es variable a lo largo del día, debido a que las emisiones primarias tienen un mayor impacto en las partículas gruesas y aumenta su proporción en dos momentos del día, de 7:00 a 9:00 h y de 17:00 a 22:00 h, contrariamente, las partículas finas tienen mayor relación con la formación de compuestos de origen secundario los cuales se presentan entre las 11:00 y las 15:00 h por lo que esta fracción representa más del 55% durante estas horas, en las horas restantes del día, la proporción entre ambas fracciones es prácticamente igual (SEDEMA, 2020).

3.2.5.1 Porcentajes de emisión

➤ MATERIA PARTICULADA PM₁₀

En 2018 en la CDMX se emitieron 8,654.8 toneladas, de las cuales el sector transporte o las fuentes móviles emitieron el 39.8% del total, de este porcentaje el mayor aporte proviene de los tractocamiones (los cuales son de jurisdicción federal), el 46.4 % proviene de fuentes de área, el 10.5% de fuentes puntuales y el 3.3% de fuentes naturales (SEDEMA, 2021a). Los aportes provienen de todo el sector de transporte, resuspensión de polvo en las vialidades pavimentadas, además, en algunas zonas del Norte hay aportes importantes por la fabricación de concreto, así como la industria alimentaria, mientras que en el Oriente pueden ser por las industrias de fabricación y comercio de concreto y grava (SEDEMA, 2018a).

3.2.5.2 Efectos en la salud humana

En 2008 Kampa y Castanas señalaron que los parámetros que juegan un papel importante en la determinación de los efectos en la salud por partículas son el tamaño, la superficie de las partículas, su número y composición. Aunque la composición es muy variable, entre los componentes principales se encuentran compuestos orgánicos, materiales de origen biológico, iones, gases reactivos, el núcleo de partículas de carbono y metales pesados, éstos últimos son peligrosos porque tienden a bioacumularse en el cuerpo humano, es decir, hay más concentración en el organismo que en el ambiente, aunado a ello, la presencia de metales en la materia particulada contribuye a su toxicidad (Kampa y Castanas, 2008), pero ésta también depende de la fuente de emisión y del tamaño de la partícula (Riojas et al., 2009). La presencia de metales pesados provoca taquicardia, incremento en la presión sanguínea, triglicéridos, neurotoxicidad, daños al riñón y anemia (Riojas et al., 2009). La inhalación de material particulado puede desencadenar múltiples respuestas celulares en el pulmón como citotoxicidad, inflamación y mutagénesis, sin embargo, no sólo se limitan al pulmón, sino que puede tener manifestaciones extrapulmonares (Alfaro-Moreno et al., 2007).

En el estudio “Contaminación atmosférica particulada ambiental y mortalidad diaria en 652 ciudades” que incluye las bases de datos de México sobre estos contaminantes, se encontró que un incremento promedio de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la concentración de PM_{10} está asociado con un incremento en la mortalidad diaria de 0.44%, con un incremento de 0.36% en la mortalidad cardiovascular diaria y con un incremento de 0.47% en la mortalidad respiratoria diaria (Liu et al., 2019).

Respecto a la morbilidad, el material particulado provoca bronquitis crónica y aguda (aumentos de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} se asocian a incrementos de 1.84%), síntomas en vías respiratorias superiores e inferiores, efectos en asmáticos, admisiones hospitalarias (incremento del 2.5% en admisiones por neumonía y del 1.72% por asma ante aumentos de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10}). En cuanto a los días de actividad restringida, aumentos en las concentraciones de PM_{10} están asociados a aumentos de 2.6% en adultos y 4.2% en las mujeres que se encargan del cuidado de menores y días de trabajo perdido (Ferrer y Escalante, 2009), además Rojas-Martínez et al. (2007) y Alfaro-Moreno et al. (2007) lo asocian con la reducción de la función pulmonar y afectaciones en el desarrollo de este.

4. OBJETIVO GENERAL

Analizar las series de tiempo de las mediciones de las concentraciones de los contaminantes Ozono (O₃), Dióxido de Azufre (SO₂), Dióxido de Nitrógeno (NO₂), Monóxido de Carbono (CO) y Material Particulado (PM₁₀) en la CDMX para el periodo 1992 - 2019 mediante los datos proporcionados por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) a fin de conocer su evolución y distribución.

4.1 Objetivos particulares

Calcular la tendencia espacial y temporal histórica de los datos de contaminación de Ozono, Dióxido de Azufre, Dióxido de Nitrógeno, Monóxido de Carbono y PM₁₀ en la CDMX en los últimos 27 años y asociarlo con fenómenos naturales o antropogénicos.

Calcular el patrón en el cuál evoluciona a lo largo del día la contaminación de Ozono, Dióxido de Azufre, Dióxido de Nitrógeno, Monóxido de Carbono y PM₁₀ en la CDMX.

Calcular el patrón de evolución a lo largo del año de la contaminación de Ozono, Dióxido de Azufre, Dióxido de Nitrógeno, Monóxido de Carbono y PM₁₀ en la CDMX.

Calcular el espectro de potencia mediante la Transformada Rápida de Fourier para determinar la periodicidad, permanencia, ciclos, frecuencia, máximos y mínimos de las concentraciones de los contaminantes Ozono, Dióxido de Azufre, Dióxido de Nitrógeno, Monóxido de Carbono y PM₁₀ en la CDMX.

5. ÁREA DE ESTUDIO

5.1 Cuenca de México

La CDMX se encuentra en la zona Suroeste de la Cuenca de México (Fig. 5-1) a una altitud promedio de 2,250 msnm en los trópicos (19.20°N) (Jáuregui, 2004), pertenece a una cuenca que está rodeada de cadenas montañosas y volcanes (Molina et al., 2009), tales como la Sierra de Guadalupe en el Noroeste, la Sierra Santa Catarina en el Noreste, la Sierra de Chichinautzin-Ajusco en el Sur-Suroeste con una altitud superior a los 3,600 msnm, la Sierra de las Cruces en el Oeste, mientras que al Sureste se ubican las elevaciones topográficas más importantes de la región: los volcanes Popocatepetl con 5,465 msnm e Iztaccíhuatl con 5,230 msnm. Las únicas aberturas que presenta son una pequeña abertura en el Norte (Salcido et al., 2010) y una interrupción en la continuidad de la cadena montañosa en el Sureste (Molina et al., 2009).

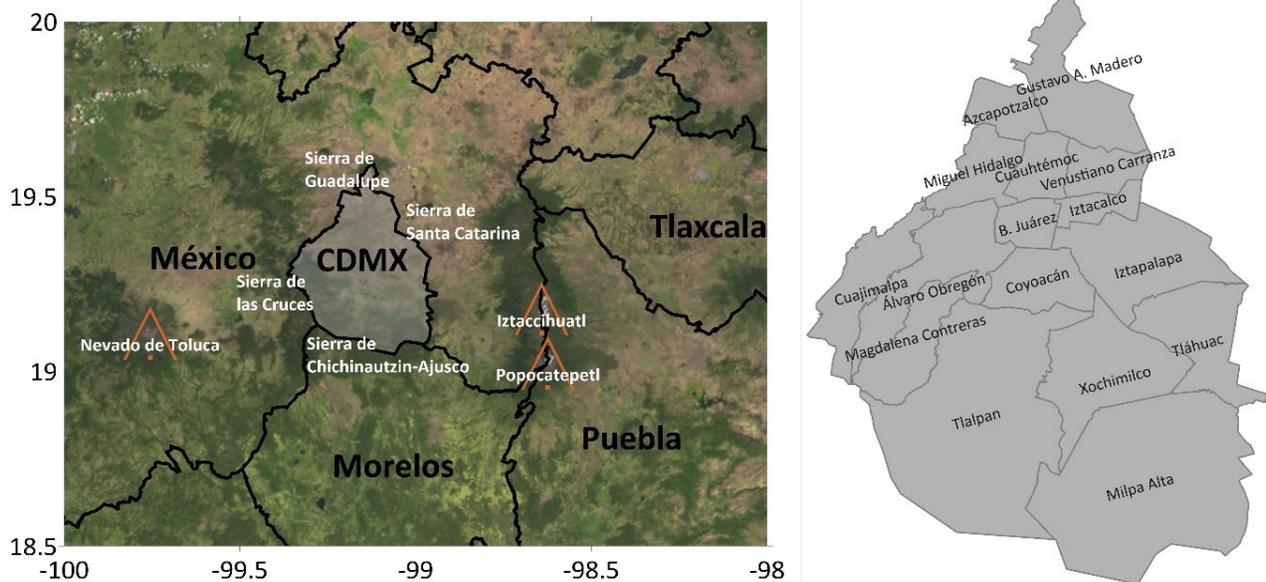


Figura 5-1 Ubicación geográfica de la Ciudad de México y localización de sus alcaldías.

5.2 Condiciones climáticas de la Ciudad de México

En 1995 Jáuregui señaló que el clima de la CDMX es tropical de montaña (según su régimen de lluvias) atemperado por la altitud, aunque, de acuerdo con el INEGI la mayor parte del territorio de la CDMX presenta clima templado subhúmedo, una porción de las alcaldías Gustavo A. Madero, Venustiano Carranza e Iztacalco presentan clima seco templado y semifrío semiseco, mientras que parte de Magdalena Contreras, Tlalpan y Milpa Alta tienen clima templado semifrío húmedo-subhúmedo, respecto a la clasificación de Koeppen modificada por Enriqueta García para México (INEGI, 2021a).

5.2.1 Estacionalidad

México se encuentra en los trópicos / subtropicos (Jáuregui, 2004) lo que ocasiona que, junto con las características de los sistemas meteorológicos predominantes se distingan dos temporadas (INEGI, 2002):

- I. La de verano, húmeda de junio a octubre que presenta clima cálido como consecuencia de la influencia de las masas de aire tropicales normalmente húmedas provenientes del Océano Pacífico, Mar Caribe y del Golfo de México
- II. La invernal, seca con clima frío influenciada por las masas de aire de tipo polar de latitudes medias de Norteamérica, sin embargo, de acuerdo con las variaciones de temperatura que se presentan en la estación seca, ésta se puede dividir como seca-caliente (marzo-mayo) y seca-fría (noviembre-febrero).

5.2.2 Temperatura

En la Ciudad de México los promedios de temperatura más altos se presentan en los meses de abril a junio, mientras que el mes más frío es enero. El promedio anual de temperatura durante el periodo de estudio ha ido aumentando, como puede verse en la Fig. 5-2, ya que, tan sólo en 1992 el promedio anual fue de 16.1 °C, mientras que para 2019 el promedio anual fue 18.8 °C. Por otro lado, la temperatura máxima promedio pasó de 23.6 °C en 1992 a 25.4 °C en el 2019, el aumento a lo largo de los años en los valores máximos no fue muy grande, mientras que la temperatura mínima promedio en 1992 fue de 8.7 °C y en 2019 fue de 12.1 °C (SMN, 2021).

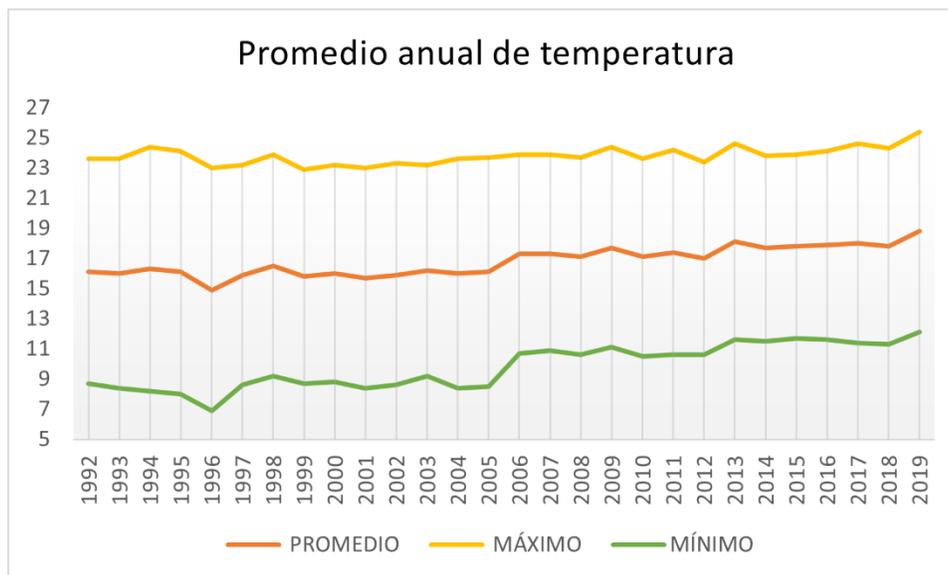


Figura 5-2 Serie de tiempo de los promedios de la temperatura de 1992 a 2019 (Elaboración propia con datos de SMN, 2021).

5.2.3 Régimen pluvial

En cuanto al régimen de lluvias en la Ciudad de México, este ha sido muy variado a lo largo del periodo de estudio, a pesar de la variabilidad es posible observar que la precipitación acumulada decrece con el paso del tiempo (Fig. 5-3), en 1992 el volumen anual de precipitación fue de 993 mm, mientras que en 2019 el volumen fue de 565.3 mm (SMN, 2021), lo cual es consistente con Jáuregui (2000), quien señaló una tendencia decreciente de la lluvia sin cambio aparente en la evaporación, comparado con las condiciones climáticas a finales del siglo XIX y principios del siglo XX influenciado por la disminución de áreas lacustres, además del proceso acelerado de urbanización ha inducido un aumento en la frecuencia de lluvias intensas de corta duración.

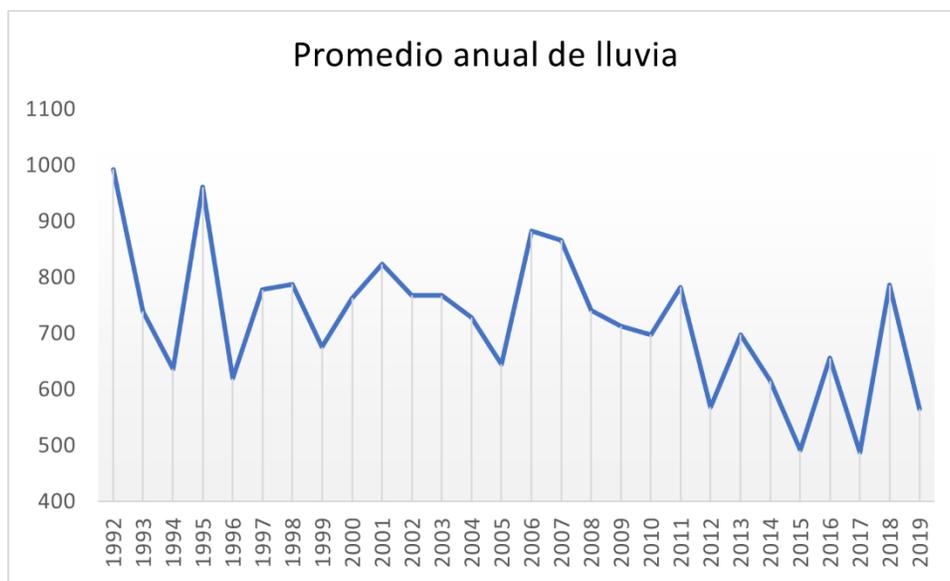


Figura 5-3 Serie de tiempo de la precipitación acumulada anual de 1992 a 2019. (Elaboración propia con datos de SMN, 2021).

5.2.4 Régimen de vientos

La Ciudad de México al pertenecer a una cuenca tiene una circulación del aire influenciada por factores tanto térmicos como dinámicos. El régimen de vientos proviene de sistemas atmosféricos sinópticos y de sistemas locales impuestos por la topografía (Jáuregui y Luyando, 1992). Por lo que describir los patrones del viento tiene una especial importancia, ya que su dirección y velocidad determinan en gran medida la distribución de los contaminantes y la calidad del aire de la ciudad.

- La circulación a escala regional, esta influenciada por los sistemas atmosféricos de macro escala tales como: La corriente húmeda de los alisios del Este asociada a la temporada de lluvias; y la corriente del Oeste asociada a la temporada seca que se presenta de noviembre a abril y se caracteriza por ser intensa (Jáuregui, 1988). Durante el periodo de secas los vientos pueden tener una dirección tanto del Norte, Sur, Este y Noreste mientras que en la temporada húmeda las direcciones son únicamente del Norte y Noreste (Jáuregui, 2000). Aunque en la primera se mencionan más direcciones aparte de la Norte, cerca del 60% de los días del año la componente del viento es del Norte (SEDEMA, 2017).
- La circulación del viento local está fuertemente influenciada por la temperatura de la superficie irradiada, dando lugar a los vientos anabáticos durante el día, cuando la insolación causa el aumento de temperatura de las laderas y del aire en contacto con ellas provocando convección, así el aire sube por éstas; mientras que, por la noche, cuando la temperatura de la superficie y la masa de aire en contacto con ella bajan, el aire desciende provocando así vientos catabáticos (Jáuregui, 2000). Visto esto como una explicación simplificada, pues las elevaciones que rodean a la ciudad tienen distinta altura y el estudio se vuelve mucho más complejo. Que estos movimientos sean los predominantes (circulación local) quiere decir que los regionales son un poco más débiles o las condiciones predominantes son anticiclónicas; si las condiciones ciclónicas son las que predominan, los vientos locales son débiles (Jáuregui y Luyando, 1992).

Es evidente entonces que los vientos en la Ciudad de México son muy variados e interactúan entre ellos cambiando la circulación a lo largo del día.

5.3 Condiciones sociales en la Ciudad de México

5.3.1 Territorio

De acuerdo con el censo de población y vivienda 2020 del INEGI, la CDMX cuenta con una población total estimada de 9,209,944 habitantes (lo que la convierte en el segundo estado más poblado a nivel nacional) distribuidos en 16 alcaldías, con una extensión total de 1,485 km² (INEGI, 2021b). Considerando los usos de suelo y las actividades que se llevan a cabo ahí, la CDMX se puede dividir en dos áreas básicas (PAOT, 2021):

- I. Área de Desarrollo Urbano (ADU)
- II. Área de Conservación Ecológica (hoy denominada Suelo de Conservación)

El Suelo de Conservación (SC) aparte de favorecer la existencia de diversas especies de flora y fauna de valor comercial, ofrece bienes y servicios ambientales tales como la infiltración de agua para la recarga del acuífero, del cual proviene aproximadamente 70% del agua que consume la CDMX; funge como barrera contra partículas producto de la contaminación, tolvánicas e incendios; captura CO₂; estabiliza los suelos al evitar la erosión; provee numerosos productos medicinales y alimenticios (PAOT, 2021) como maíz, maguey, nopal, avena, entre otros, de consumo y venta local (SEDEREC, 2018); regula el clima y aportan lugares de recreación con valor escénico y cultural (SEDEMA, 2016). Además de incluir suelos aptos para el desarrollo de actividades económicas primarias, como las agrícolas, pecuarias y acuícolas, también se localizan las Áreas Naturales Protegidas (ANP's), importantes para la conservación de la diversidad biológica (PAOT, 2021).

De acuerdo con la SEDEREC (2018) el 59% del territorio de la CDMX concentra actividades rurales en una superficie de 87 mil 296 hectáreas pertenecientes a siete alcaldías (Álvaro Obregón, Cuajimalpa de Morelos, La Magdalena Contreras, Milpa Alta, Tláhuac, Tlalpan y Xochimilco), es decir el 41% del territorio se consideraría urbano.

A pesar de que las cifras son alentadoras respecto a las áreas naturales y de conservación, la realidad es que el Suelo de Conservación está sometido a una presión constante (FAO, 2021) pues parte de su extensión se encuentra sometida a procesos de urbanización en muchos casos ilegales (Checa-Artasu, 2016), a esto se agrega la tala ilegal,

los incendios forestales, estado fitosanitario de los bosques, las actividades de libre pastoreo, el incremento de zonas agrícolas y principalmente, el crecimiento de la mancha urbana (GDF, 2012) provocando el deterioro del suelo y a su vez cambios en el microclima y circulación de la ciudad.

5.3.2 Consumo energético

Los patrones de producción y consumo de energía en la Ciudad de México son un factor fundamental para integrar en el entendimiento de la contaminación y su comportamiento. El consumo energético en la zona central del país, de acuerdo con el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional durante el 2017 fue de 60,685 Gigawatt-hora, lo que corresponde al 19.59% de todo el país (SENER, 2018), cifra que muestra la demanda que supone la sobrepoblación que se presenta en la ciudad.

5.3.3 Transporte y Movilidad

El aumento de la flota vehicular trae consigo un aumento en la emisión de contaminantes por fuentes móviles. De acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones del 2016, el sector transporte es el de mayor consumo de combustibles fósiles y aporta a la atmosfera PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_x y CO_2 en grandes concentraciones (SEDEMA, 2018a).

En la Ciudad de México la necesidad de movilidad continúa en aumento al igual que el uso de los vehículos de baja capacidad, mientras que la red de transporte público es insuficiente, provocando así, vías saturadas (SEMOVI, 2021). Prueba de esto es que en el inicio del periodo de estudio (1992), los vehículos de motor registrados en México en circulación eran 11,260,184 y para el término del periodo de estudio (2019) eran ya 49,869,688, de los cuales el 12 % pertenecen a la Ciudad de México (INEGI, 2020), es decir casi 6 millones.

En los últimos años se ha vuelto cada vez más evidente todo lo que conlleva estudiar los patrones de movilidad de la población en la CDMX y su importancia, pues pone de manifiesto no sólo la cantidad de fuentes de emisión de contaminantes sino los problemas de desigualdad social inmersos en ella, los tiempos de traslado, el tipo o la justificación del traslado, las horas en las que el tránsito es mayor, el medio de transporte más utilizado entre la población, el número y género de personas que utilizan cada medio de transporte, entre otros.

Así, de acuerdo con la Encuesta Origen Destino (EOD) en Hogares de la Zona Metropolitana del Valle de México (INEGI, 2017):

- Dentro de la CDMX, es decir, entre delegaciones, se realizan 15.09 millones de viajes diarios.
- De los Municipios conurbados del Estado de México y Tizayuca hacia la CDMX se realizan 2.25 millones de viajes diarios.
- De la Ciudad de México hacia las zonas del Estado de México y Tizayuca se realizan 2.16 millones.

Lo anterior refleja que los patrones de movilidad diarios en la CDMX son resultado de la centralización de bienes, servicios, actividades recreativas, centros de trabajo, entre otras, que hacen que la movilidad sea caótica respecto al tamaño de la ciudad y su población.

5.3.4 Industria

De las fuentes puntuales registradas en el Inventario de Emisiones de la Ciudad de México 2016, 875 son industrias que manifiestan su desempeño ambiental, aunque el INEGI tiene registradas en realidad 32 mil industrias en la Ciudad de México. Son Iztapalapa, Azcapotzalco y Gustavo A. Madero las delegaciones con mayor concentración industrial entre las que destacan los sectores: alimenticio, químico, de impresión, de fabricación de productos metálicos, plástico y hule, equipo de transporte, insumos textiles y papel (SEDEMA, 2018a). Por otra parte, hay 711 industrias de competencia local, de las cuales el 42% se dedica a la panificación, a la impresión o a la elaboración de productos de plástico y se concentran en Azcapotzalco e Iztapalapa (SEDEMA, 2018a).

5.3.5 Comercios y servicios

El Inventario de Emisiones de la Ciudad de México 2016, reporta 2,900 comercios y servicios regulados, que manifiestan su desempeño ambiental (sus emisiones se reportan dentro de las fuentes puntuales), mientras que las no reguladas se reportan en fuentes de área. Son las alcaldías Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo y Benito Juárez en donde se ubica el 46% del total de los comercios, los sectores que destacan son los restaurantes, hoteles, hospitales y consultorios, tiendas de autoservicio y departamentales (representando el 72% de los establecimientos regulados), servicios de entrenamiento y recreación, talleres automotrices y almacenamiento de combustible (SEDEMA, 2018a). De acuerdo con la clasificación del INEGI, el 97% de estos son pequeños y micronegocios.

5.4 Factores climáticos que determinan la formación y dispersión de contaminantes en la CDMX

Debido a la altitud, el oxígeno en la Ciudad de México es 23% menor al encontrado a nivel del mar, como consecuencia, los procesos de combustión son incompletos y contribuyen a la generación de más contaminantes (SEDEMA. 2006), aunado a esto, los factores a continuación mencionados son los de mayor importancia en cuanto a la generación de contaminación en la atmósfera en la Ciudad de México.

La tasa de ventilación de la cuenca determina la carga contaminante y los impactos regionales de la pluma de contaminantes urbana, la ventilación es eficaz si existe una combinación de advección horizontal, convergencia cercana a la superficie y difusión vertical (Foy et al, 2006). También se presentan factores ambientales que influyen en la dispersión de contaminantes y, por lo tanto, en la calidad del aire.

5.4.1 Capa de Mezcla

La capa límite atmosférica (CLA) es la región de la troposfera que está en contacto directo con la superficie terrestre y responde a sus forzamientos, en ella se llevan a cabo procesos de transporte como la convección y la turbulencia. Su espesor varía espacial y temporalmente (Burgos, 2021), desde unos cientos de metros a un par de kilómetros, alcanzando su máximo espesor poco después del mediodía (Jáuregui, 1983). En la CDMX el comportamiento de esta capa está limitado tanto por movimientos convectivos, debidos a la insolación, como por advección, inducida por los flujos debido a la topografía de la cuenca (Burgos, 2021). El viento medio horizontal en esta región transporta humedad, calor y contaminantes, este puede alcanzar velocidades de 10 m/s, aunque normalmente es frenado debido a las estructuras y edificios (Burgos, 2021).

La Capa de Mezcla (CM) aparece desde las primeras horas de la mañana por un diferencial térmico inducido por la radiación solar en la superficie y el aire en su proximidad que promueve el ascenso del aire (Stull 1988), ayudando a la dispersión vertical de

contaminantes. Cuando el Sol se va ocultando y la radiación decrece la capa evoluciona a la par, disminuyendo así los movimientos convectivos por lo que hay ya poca turbulencia (De Arruda et al., 2018) y, por ende, hay una menor dispersión vertical de contaminantes. Esta ausencia de turbulencia y movimientos convectivos propician la generación de la Capa residual nocturna, normalmente estratificada (Burgos, 2021), sin embargo, en la Ciudad de México, la atmósfera además se ve afectada por el fenómeno llamado Isla de Calor.

5.4.2 Isla de Calor

La isla de calor es un fenómeno en el que la temperatura medida en la ciudades es mayor que en las zonas rurales circundantes (Cui y De Foy, 2012; Jáuregui y Luyando, 1992; Jáuregui, 2004), este contraste originado por la urbanización (Jáuregui y Luyando, 1992; Jáuregui, 2004), es decir el calor que se genera en una cuenca urbanizada como la de la Ciudad de México y el pavimento cuya capacidad térmica y de conductividad es mayor que la cobertura vegetal, provocan cambios en el microclima de la ciudad pues alteran uno de los factores más importantes como la temperatura. A pesar de que la llamada Isla de calor urbano (UHI) es un fenómeno principalmente nocturno, la Ciudad de México también presenta tal fenómeno durante el día (Ballinas y Barradas, 2016). Cui y de Foy (2012) encontraron que UHI es alta en las noches durante casi todo el año, solo en temporada de lluvias es baja, por otro lado, la UHI diurna es baja durante todo el año, pero aumenta durante la estación húmeda.

5.4.3 Inversiones térmicas

La inversión térmica es una condición de inestabilidad atmosférica (Jáuregui, 2000) en la que el aire cerca de la superficie es más frío que el aire en altura, generando una condición contraria a lo esperado pues generalmente la temperatura decrece con la altura durante las horas de radiación (Burgos, 2021). Cuando el suelo se enfría por la pérdida de calor en la noche provoca madrugadas en las que el aire cerca de la superficie es frío y más denso, por

lo que difícilmente asciende, aunado a esto, la interacción de los vientos de montaña que caen durante la noche e igualmente son fríos generan que los movimientos convectivos verticales se inhiban durante las primeras horas del día (Jáuregui, 2000), y los contaminantes no se dispersan más arriba de la capa de mezcla (Burgos, 2021; Jáuregui, 2000) tanto en la vertical como horizontal, pues en la mañana los vientos son convergentes (Jáuregui y Luyando, 1992). La temporada donde usualmente ocurren estas condiciones es la invernal, mientras que la temporada de lluvias presenta muy pocas veces inversiones térmicas (Jáuregui, 2000).

5.4.4 Presión atmosférica

Las condiciones de presión atmosférica determinan los movimientos de convergencia o divergencia de las masas de aire.

- Cuando los sistemas de baja presión (ciclónicos) están presentes, habrá nubosidad lo que reduce la incidencia de radiación solar inhibiendo la formación de compuestos fotoquímicos, también se podrán presentar tormentas y lluvias que limpien o, de acuerdo con Jáuregui (2000), laven la atmósfera.
- Los sistemas de alta presión (anticiclónicos) ocasionan cielos estables y con movimientos descendentes de aire, los cuales desfavorecen la dispersión de contaminantes en la atmósfera, además, están asociados a cielos despejados que favorecen el incremento de la temperatura y la incidencia de la radiación solar que promueve la formación de compuestos como el Ozono (SEDEMA, 2020).

5.5 Legislación atmosférica en la CDMX

5.5.1 Proceso de creación de la legislación atmosférica en la Ciudad de México

Desde 1940, en la CDMX se tuvo conocimiento sobre la creciente perturbación en la atmósfera, cuando se identificó en el Observatorio Nacional de Tacubaya que la visibilidad (como indicador) era de 4 a 10 km y una década más tarde, se redujo de 2 a 4 km, aunque, fue hasta 1950 que la Dirección de Higiene Industrial de la Secretaría de Salubridad y Asistencia (SSA), hoy Secretaría de Salud, realizó formalmente las primeras investigaciones sobre la contaminación ambiental en la Ciudad de México (SEDEMA, 2021b).

1966

Se instalaron las primeras cuatro estaciones para el monitoreo de únicamente dióxido de azufre, partículas suspendidas, polvo sedimentable y acidez (SEDEMA, 2021b).

1967

La Organización Panamericana de la Salud instaló la Red Panamericana de Muestreo Normalizado de la Contaminación del Aire (REDPANAIRES) con 10 estaciones extra a las ya existentes (SEDEMA, 2021b).

1971

Se dio a conocer oficialmente la problemática del deterioro ambiental y las propuestas de control de este con la publicación de la primera Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental (DOF, 1971) cuya autoridad de aplicación era la Secretaría de Salubridad y Asistencia (INECC, 2007).

1972

Se reconoció la crisis climática de manera global en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano (CNUMH), exponiendo los impactos del hombre y su modelo de desarrollo económico sobre el medio, además se dio a conocer el plan de acción a seguir como recomendación (ONU, 1973). Se relacionó por primera vez el ámbito de los derechos humanos y el medio ambiente (CDHDF, 2017). Esta conferencia inició la creación de instrumentos y arreglos internacionales en materia ambiental, como la Declaración de

Estocolmo que, aunque es jurídicamente no vinculante, estableció los principios en materia ambiental que se convertirían en una referencia obligada y es a partir de ese momento que se internacionalizó el derecho ambiental (Hernández et al., 2021). Como consecuencia de lo anterior y ante la necesidad de dar solución a la problemática ambiental se crearon herramientas para conocer el origen y las acciones que perturbaban el ambiente (Aguilar et al., 2019), así como organismos gubernamentales y leyes encargados de estos temas (CESOP, 2006). Por ejemplo, se creó la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente (SSMA) (INECC, 2007), primera institución pública encargada de atender, prevenir y controlar los problemas de la contaminación ambiental.

1973

El gobierno mexicano y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) aumentaron a 22 las estaciones de monitoreo e integraron la Red Computarizada Automática de Monitoreo Atmosférico del Valle de México, también llamada Red Phillips (SEDEMA, 2021b).

1979

Se firmó el acuerdo que establece el Programa Coordinado para el Mejoramiento de la Calidad del Aire en el Valle de México (1979-1982) (Bravo-Álvarez et al., 2002).

1982

Se sustituyó la ley de 1971 por la Ley Federal para la Protección al Ambiente, poco después se introdujeron cambios a la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal (LOAPF) lo cual dio lugar a la creación de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) (INECC, 2007). Además, el Gobierno de la ciudad creó una herramienta para que la población en general entendiera los niveles de contaminación en la atmósfera y la calidad del aire que respiramos a través de una escala en donde se identificaba al contaminante según su capacidad de ocasionar malestar, llamado Índice Metropolitano de Calidad el Aire (IMECA), que bajo la Norma Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019 actualmente es el Índice de Aire y Salud, que a su vez sustituyó al Índice de Calidad del Aire (SEDEMA, 2021c).

1985

Se puso en marcha un sistema de monitoreo atmosférico más sofisticado con 25 estaciones, un centro de cómputo y procesamiento, dos radares sónicos y 10 torres meteorológicas (SEDEMA, 2021b).

1986

Inició la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), de donde se obtuvieron los datos para este estudio, perteneciente al Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT), con 25 estaciones automáticas (19 en la CDMX y 6 en el Estado de México) para la medición de O₃, CO, SO₂, NO_x y variables atmosféricas, así como equipos manuales para partículas suspendidas totales (PST) y su contenido de Plomo (Pb) (SEDEMA, 2021b).

1988

Entró en vigor el instrumento jurídico Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), la cual sustituyó a la ley de 1982 (INECC, 2007) y es la base de la política ambiental mexicana pues dio pauta a la construcción de normas y gestión del ambiente (CESOP, 2006).

1993

Como medida para el manejo de la contaminación se propuso la creación de una normatividad para mejorar la calidad de vida, por lo que fueron generadas las Normas Oficiales Mexicanas y se publicaron en 1994 (SEDEMA, 2021c), las cuales establecen la calidad ambiental con base en los valores de concentración máxima permisible para la salud pública de contaminantes determinados.

1996

Se dio a conocer el instrumento de gestión llamado PROAIRE-Programa para el Mejoramiento de la Calidad del Aire en el Valle de México, 1995-2000, actualmente hay varios de ellos (Bravo-Álvarez et al., 2002).

En resumen, es en la década de los años 70 cuando la gestión del medio ambiente comenzó a incorporarse a la política en México, resultando algo tardía ya que hasta esos años se tenía cierto recelo sobre los efectos a la salud que podía causar la contaminación atmosférica, esto a pesar de que en la “Primera Reunión de Expertos” en 1978 la contaminación del aire era considerada ya "una de las más críticas en el mundo” (Soto, 2017).

5.5.2 Normas Oficiales Mexicanas y el “Índice AIRE Y SALUD”

La mala calidad del aire en la CDMX está presente casi todos los días del año, por tal motivo los ciudadanos pasan la mayor parte de sus días expuestos a los daños potenciales que ésta puede causar. A fin de reducir los niveles de concentración de los contaminantes y reducir la carga de morbilidad derivada de ellos, se han creado: Normas Oficiales Mexicanas (NOM) establecidas por el Gobierno Federal y de carácter obligatorio, valores de las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS) que ofrecen una orientación a nivel mundial y valores límite de los estándares regulados a través de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S EPA). A continuación, se presentan las NOM's para cada contaminante de interés en este trabajo y su última actualización (Tabla 5-1) así como la comparación de valores límite permisibles de la OMS, U.S EPA y el Gobierno Federal (Tabla 5-2).

Tabla 5-1 Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiental de cada contaminante y su última actualización (Tomado del Informe Anual de Calidad del Aire 2018 Ciudad de México. SEDEMA, 2020).

Contaminante	NOM	Última actualización
Ozono O ₃	020-SSA1-2014	19 de agosto del 2014
Monóxido de Carbono CO	021-SSA1-1993	23 de diciembre de 1994
Dióxido de Azufre SO ₂	022-SSA1-2010	8 de septiembre del 2010
Dióxido de Nitrógeno NO ₂	023-SSA1-1993	23 de diciembre de 1994
PM ₁₀	025-SSA1-2014	20 de agosto del 2014

Tabla 5-2 Comparación de los valores de concentración máxima de O₃, CO, NO₂, SO₂ y PM₁₀ con respecto a los valores límite de la NOM, valores guía OMS y el estándar de la U.S. EPA para cada uno (Tomado del Informe anual calidad del aire 2018 Ciudad de México. SEDEMA, 2020).

SO ₂	NOM		OMS	U.S. EPA	
	Máximo en 24 h	2° máximo en 8 h	Promedio anual	Máximo en 24 hrs	Promedio trianual percentil 99
	110 ppb	200 ppb	25 ppb	20 µg/m ³	75 ppb

NO ₂	NOM	OMS		U.S. EPA	
	No exceder Máximo en 1 h	Máximo en 1 h	Promedio anual	Percentil 99 del promedio de 1 h evaluado en 3 años	Promedio anual
	210 ppb	200 µg/m ³	40 µg/m ³	100 ppb	53 ppb

CO	NOM	OMS		U.S. EPA	
	No exceder máximo de 8 h	Máximo 1 h	Máximo 8 h	Máximo 1 h	Máximo 8 h
	11 ppm	30,000 µg/m ³	10,000 µg/m ³	35 ppm	9 ppm

O ₃	NOM		OMS	U.S. EPA	
	No exceder máximo 1 h	Máximo 8 h	Máximo 8 h	4° máximo del promedio 8 h evaluado en 3 años	
	95 ppb	70 ppb	100 µg/m ³	75 ppb	

PM ₁₀	NOM		OMS		U.S. EPA
	Máximo 24 h	Promedio anual	Percentil 99 24 h	Promedio anual	Promedio trianual del 2° máximo 24 h
	75 µg/m ³	40 µg/m ³	50 µg/m ³	20 µg/m ³	150 µg/m ³

Por otra parte, el índice AIRE Y SALUD es una homologación del cálculo y difusión de los niveles de la contaminación en el aire cuyo objetivo es dar a conocer el estado de la

calidad del aire. En la Tabla 5-3 se presenta el intervalo de concentración asociado al nivel de riesgo para cada contaminante y en la Tabla 5-4 se presenta el riesgo mediante la asignación de un color específico, los probables daños a la salud que ocasionan, así como los síntomas posibles, y además proporciona recomendaciones para reducir la exposición de los grupos sensibles y la población en general. Esto se reporta cada hora los 365 días del año, para cada una de las 29 estaciones automáticas de monitoreo de la calidad del aire (SEDEMA, 2021c).

Tabla 5-3 Obtención del Índice AIRE Y SALUD, Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud (Modificado de DOF, 2019).

Calidad del aire	Nivel de riesgo asociado	Intervalo de PM ₁₀ promedio móvil ponderado de 12 horas (µg/m ³)	Intervalo de Ozono (O ₃) promedio móvil de 8 horas (ppm)	Intervalo de Dióxido de Nitrógeno (NO ₂) promedio de 1 hora (ppm)	Intervalo de Dióxido de Azufre (SO ₂) promedio móvil de 24 horas (como aproximación al promedio de 24 horas) (ppm)	Intervalo de Monóxido de Carbono (CO) promedio móvil de 8 horas (ppm)
Buena	Bajo	≤ 50	≤ 0.051	≤ 0.107	≤ 0.008	≤ 8.75
Aceptable	Moderado	>50 y ≤75	>0.051 y ≤0.070	>0.107 y ≤0.210	>0.008 y ≤0.110	>8.75 y ≤11.00
Mala	Alto	>75 y ≤155	>0.070 y ≤0.092	>0.210 y ≤0.230	>0.110 y ≤0.165	>11.00 y ≤13.30
Muy Mala	Muy Alto	>155 y ≤235	>0.092 y ≤0.114	>0.230 y ≤0.250	>0.165 y ≤0.220	>13.30 y ≤15.50
Extremadamente Mala	Extremadamente Alto	>235	> 0.114	>0.250	>0.220	>15.50

Tabla 5-4 Índice AIRE Y SALUD (Modificado de SEDEMA, 2021c).

Índice AIRE Y SALUD	Nivel de riesgo asociado	Recomendaciones	
		Para toda la población	Grupos sensibles
Buena	Bajo: Se considera que el riesgo es mínimo	Disfruta las actividades al aire libre	
Aceptable	Moderado: Las personas sensibles pueden experimentar síntomas respiratorios (asmáticos), posible agravamiento de enfermedad pulmonar y cardiaca en personas con enfermedad cardiopulmonar y adultos mayores.	Disfruta las actividades al aire libre.	Reducir las actividades físicas vigorosas al aire libre.
Mala	Alto: Para todos los contaminantes criterio existe probabilidad de disminución en la capacidad pulmonar en personas sanas. Incremento en la probabilidad de aparición de síntomas respiratorios en personas sensibles (niños, ancianos, personas con deficiencias nutricionales, personas que realizan actividades en exteriores, ciclistas, trabajadores). En personas con enfermedades respiratorias (EPOC, asma) y cardíacas (angina de pecho) hay aumento en la probabilidad de agravamiento y disminución en la tolerancia de la actividad física, así como mayor probabilidad de muertes prematuras en personas con enfermedad cardíaca o pulmonar.	Reduce las actividades físicas vigorosas al aire libre.	Evita las actividades físicas (tanto moderadas como vigorosas) al aire libre.
Muy Mala	Muy Alto: Para todos los contaminantes criterio, mayor probabilidad de presencia de síntomas respiratorios en población general. Agravamiento de síntomas respiratorios en poblaciones sensibles (niños, adultos mayores, personas que trabajan en exteriores, ciclistas) y en personas con enfermedad pulmonar (EPOC y asma). Incremento en síntomas cardiovasculares, como dolor precordial, en personas enfermas del corazón, así como mayor probabilidad de muertes prematuras en personas con enfermedad cardíaca o pulmonar.	Evita las actividades físicas moderadas y vigorosas al aire libre.	No realices actividades al aire libre. Acudir al médico si se presentan síntomas respiratorios o cardíacos.
Extremadamente Mala	Extremadamente Alto: Para todos los contaminantes criterio, incremento en la probabilidad de síntomas severos respiratorios en población general. Serios efectos respiratorios y agravamiento de síntomas en personas sensibles (niños, adultos mayores, persona con deficiencias nutricionales) y en personas con enfermedad pulmonar (asma y EPOC). Agravamiento de síntomas cardiovasculares en enfermos del corazón (como angina de pecho) e incremento en la probabilidad de muerte prematura en personas con enfermedad pulmonar y cardíaca.	Permanece en espacios interiores. Acudir al médico si se presentan síntomas respiratorios o cardíacos.	

5.5.3 Programas para mejorar la Calidad del aire

Los primeros cambios del Gobierno referentes a la atención de problemas relacionados con el medio ambiente se dieron en la década de los 70, a razón de que en México la política ambiental es una de las políticas públicas más recientes, sin embargo, al inicio de la década de los 80 fue cuando las políticas ambientales del gobierno tuvieron mayor proyección al tratar de hacerlas mucho más integrales, olvidando así, las perspectivas sectorizadas de la gestión ambiental (SEMARNAP, 2000).

En 1987 el gobierno hizo público el Programa “100 Acciones Necesarias contra la Contaminación” (SEMARNAP, 2000), siendo casi el 20% referentes a las fuentes móviles (transporte) de contaminación del aire y otro casi 20% a las fuentes fijas (industria y servicios). Para las primeras acciones, el gobierno se comprometía a (Ugalde, 2020):

- La aplicación de tecnologías en vehículos nuevos
- Implementar la verificación vehicular obligatoria
- Otorgar incentivos fiscales para conseguir equipos de verificación vehicular, transporte escolar y sindical
- Mejorar y reformular los combustibles
- Elaborar normas
- Ampliar el sistema de transporte colectivo no contaminante, especialmente el Metro, y el mantenimiento de las unidades del sistema Ruta 100 (en donde se implementaron unidades delfín)
- Mejorar la fluidez del tránsito en vialidades primarias, así como establecer un horario para el reparto de mercancías, poner en marcha un programa para disminuir los desplazamientos por motivos laborales, tanto en el sector público como en el privado

Posteriormente, el 20 de noviembre de 1989 se puso en marcha el Programa “Hoy No Circula” en la ZMVM, que originalmente era temporal (sólo para el período invernal) pero para 1990 se estableció que tendría vigencia permanente (Martínez et al; 2018). En adición con la problemática de la contaminación del aire y por ende la calidad de este, el Gobierno de la CDMX creó en 1990 el Programa “Integral Contra la Contaminación Atmosférica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México” (PICCA) cuyo fin era llevar a cabo una serie

de acciones en conjunto con todos los sectores de la sociedad que ayudaran a mitigar la contaminación. El plan de acción comprendía un mediano plazo, específicamente quedarían concluidos en la década de los 90 pero requerían sostenimiento durante décadas (SEDEMA, 1990). En la Fig. 5-4 se presentan las acciones implementadas para mejorar la calidad del aire en la Ciudad de México desde principios de los años noventa.

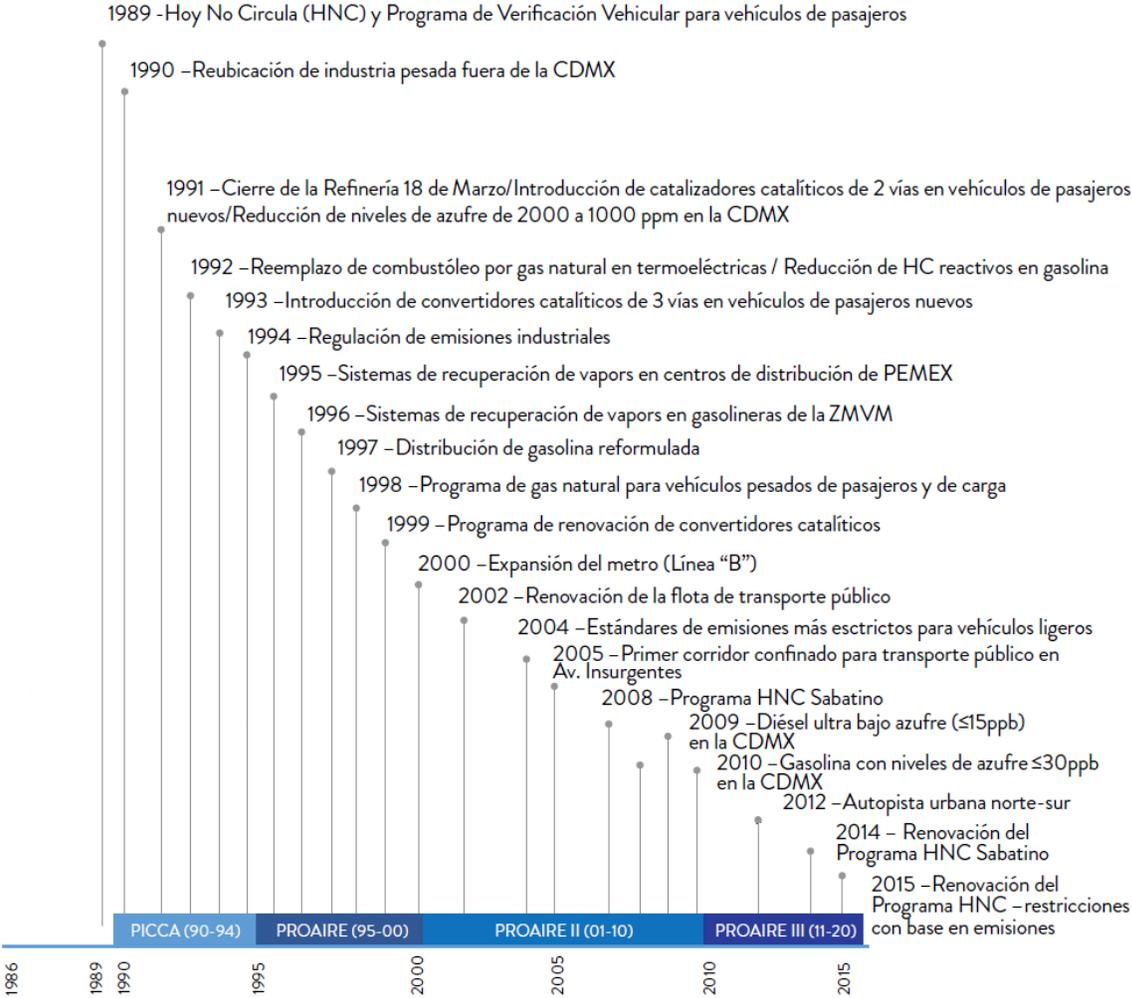


Figura 5-4 Acciones implementadas para mejorar la calidad del aire en la Ciudad de México desde principios de los años 90 (SEDEMA, 2018b).

5.6 Monitoreo de la Calidad del Aire en la Ciudad de México con la Red Automática de Monitoreo Atmosférico

El gobierno de la CDMX consideró necesario implementar un programa que permitiera difundir y conocer el estado de la calidad del aire luego de diversos estudios que marcaban la relación existente entre la salud poblacional y el estado de la atmósfera. Es así como se creó el Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT), cuyos objetivos son generar información para informar a los habitantes sobre la contaminación del aire, cuantificar los niveles de exposición y sus riesgos, proveer información y datos para: activar o desactivar alertas como contingencias, evaluar y dar seguimiento a las diferentes estrategias de gestión de calidad del aire, estimar la distribución espacial y el transporte de los contaminantes, evaluar el cumplimiento de las NOM sobre salud ambiental y la tendencia histórica de los contaminantes en la CDMX y zona conurbada y, dictar el estado de la calidad del aire con respecto a la concentración de los contaminantes criterio (SEDEMA, 2021d).

Operacionalmente, el SIMAT está conformado por cuatro subsistemas, uno de ellos es la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) en cuyas 34 estaciones de monitoreo (Tabla 5-5 y Fig. 5-5) se utilizan equipos continuos para medir los contaminantes criterio (Dióxido de azufre, Monóxido de Carbono, Dióxido de Nitrógeno, Ozono y $PM_{2.5}$ y PM_{10}) que marca la normatividad federal, además cuenta con un laboratorio para el análisis fisicoquímico de muestras (LAA), el mantenimiento y calibración de los equipos y un centro de procesamiento y difusión de datos (CICA). El monitoreo en la RAMA es consistente con el método de referencia o el método equivalente que sugiere la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA) y lo sugerido por la Norma Oficial Mexicana para cada contaminante a fin de que los datos generados sean reproducibles (SEDEMA, 2021e).

Tabla 5.-5 Estaciones de monitoreo pertenecientes a la RAMA en la Ciudad de México (SEDEMA, 2021f).

Nombre de la estación	Alcaldía	Región	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)
CAM (Camarones)	Azcapotzalco	NO	19.468404	-99.169794	2233
MGH (Miguel Hidalgo)	Miguel Hidalgo	NO	19.404050	-99.202603	2366
GAM (Gustavo A. Madero)	Gustavo A. Madero	NE	19.482700	-99.094517	2227
BJU (Benito Juárez)	Benito Juárez	CE	19.371612	-99.158969	2250
HGM (Hospital General de México)	Cuauhtémoc	CE	19.411617	-99.152207	2234
MER (Merced)	Venustiano Carranza	CE	19.424610	-99.119594	2245
AJM (Ajusco Medio)	Tlalpan	SO	19.272100	-99.207658	2619
AJU (Ajusco)	Tlalpan	SO	19.154674	-99.162459	2953
CCA (Centro de Ciencias de la Atmósfera)	Coyoacán	SO	19.326200	-99.176100	2280
CUA (Cuajimalpa)	Cuajimalpa de Morelos	SO	19.365313	-99.291705	2704
PED (Pedregal)	Álvaro Obregón	SO	19.325146	-99.204136	2326
SFE (Santa Fe)	Cuajimalpa de Morelos	SO	19.357357	-99.262865	2599
IZT (Iztacalco)	Iztacalco	SE	19.384413	-99.117641	2238
MPA (Milpa Alta)	Milpa Alta	SE	19.176900	-98.990189	2594
TAH (Tláhuac)	Xochimilco	SE	19.246459	-99.010564	2297
UAX (UAM Xochimilco)	Coyoacán	SE	19.304441	-99.103629	2246
UIZ (UAM Iztapalapa)	Iztapalapa	SE	19.360794	-99.073880	2221
SAC (Santiago Acahualtepec)	Iztapalapa	SE	19.345610	-99.009381	2293

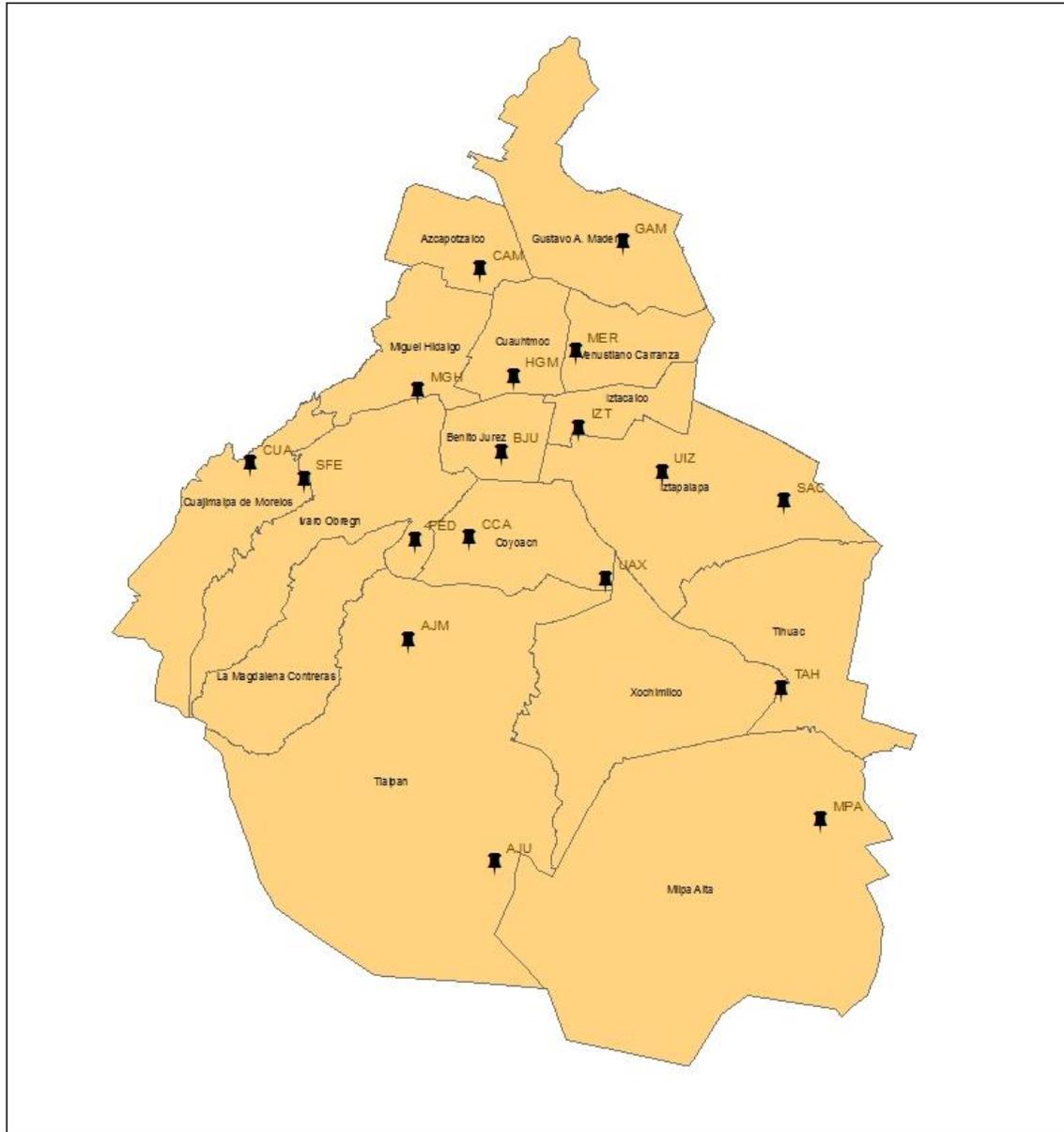


Figura 5-5 Ubicación geográfica de las estaciones pertenecientes a la RAMA en la Ciudad de México. La línea punteada corresponde a la delimitación territorial de la CDMX.

5.6.1 Principio de Operación del Monitoreo automático de contaminantes

Las mediciones de contaminantes criterio, gases y partículas están sujetas a los principios de operación de los equipos según los métodos de referencia o equivalentes establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas o bien, por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos U.S. EPA (INE, 2021).

El principio de operación de cada instrumento está determinado por alguna propiedad física o química del compuesto a analizar (SEDEMA, 2021e), todos los analizadores cuentan con tres sistemas internos e independientes: neumático, electrónico y óptico que determinan la concentración del contaminante (INE, 2021).

1. Un sistema que consta de la bomba de succión y las conexiones por donde circula la muestra de gas contaminante.
2. Un software operativo que controla el funcionamiento del analizador y lleva a cabo automáticamente los cálculos para el reporte de resultados.
3. Se aplica el método de medición del analizador, mediante el proceso físico o químico correspondiente.

A continuación, se presenta el principio de operación de cada instrumento que analiza cada contaminante de interés, de acuerdo con el Manual 3: Redes Estaciones y Equipos de Medición de la Calidad del Aire realizado por el Instituto Nacional de Ecología (INE, 2021).

5.6.1.1 Analizador de Ozono (O₃)

El principio de operación del instrumento utilizado para medir el O₃ es la fotometría UV, el método equivalente corresponde a la medición de la absorción por el Ozono de la luz ultravioleta a una longitud de onda de 254 nm. Este principio se basa en la Ley de Beer-Lambert.

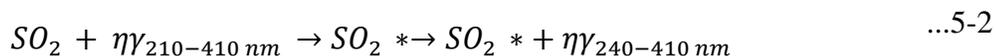
Una vez que la muestra pasa por las celdas la molécula de Ozono absorbe una cantidad de luz, que se compara con la cantidad de luz medida en la celda de referencia para estimar la concentración, la cual se corrige bajo condiciones específicas de temperatura y presión medidos independientemente dentro de la celda de absorción. A condiciones estándares de Presión y Temperatura, la concentración se obtiene de:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\alpha LC} \quad \dots 5-1$$

I es la intensidad de la luz después de la absorción, I_0 es la intensidad de la luz antes de la absorción, α es el coeficiente de absorción del O₃ a determinada longitud de onda, L es la longitud de la celda o tubo de absorción y C es la concentración del gas absorbente (O₃).

5.6.1.2 Analizador de Dióxido de Azufre (SO₂)

El principio de operación del instrumento utilizado para medir el SO₂, se basa en la fluorescencia UV, el tipo de método es el equivalente, ya que cuando las moléculas de SO₂ absorben radiación ultravioleta a una longitud de onda de entre 210 a 410 nm ($\eta\gamma_{210nm}$), entran a un estado de excitación para posteriormente decaer a un estado de energía menor, emitiendo un pulso de luz fluorescente de una longitud de onda mayor en el intervalo de 240 a 410 nm ($\eta\gamma_{240-410nm}$), de modo que este pulso de luz fluorescente es proporcional a la concentración del contaminante, tal como lo muestra la reacción:



5.6.1.3 Analizador de Monóxido de Carbono (CO)

El principio de operación del instrumento utilizado para medir el CO se basa en la absorción en el infrarrojo (IR), el tipo de método es de referencia. El haz infrarrojo pasa por un filtro rotatorio integrado por dos celdas, una de las cuales contiene CO en alta concentración y la otra N₂ usado como blanco para crear el haz de referencia (filtro de correlación de gas), así el detector mide la diferencia de energía entre la radiación absorbida en la celda de muestra y la señal modulada por la alternancia entre los filtros de gas. Dicha señal es procesada para interpretarse como la concentración del contaminante.

5.6.1.4 Analizador de Dióxido de Nitrógeno (NO₂)

El principio de operación del instrumento utilizado para medir el NO₂ se basa en el método de referencia de la quimioluminiscencia, la cual es una técnica para medir la cantidad de luz generada (en el intervalo del infrarrojo entre 500 y 3000 nm) luego de una reacción química dada por:



Cuando el NO contenido en una muestra de aire reacciona con el O₃ (que genera un dispositivo que es parte de los componentes del instrumento tratando el oxígeno del aire con luz UV dentro de un tubo de cuarzo) forma dióxido de nitrógeno en estado de excitación (NO₂^{*}). Posteriormente, cuando el NO₂^{*} vuelve al estado inicial emite una luz característica en una cantidad proporcional a la concentración del NO contenido en la muestra.

5.6.1.5 Muestreador de partículas suspendidas (PM₁₀ y PM_{2.5})

El muestreador de PM₁₀ y PM_{2.5} determina la concentración de partículas aprovechando las propiedades físicas de las mismas.

Se utiliza el principio de operación de Gravimetría cuyo método equivalente es la determinación de la masa de partículas presente en un flujo de aire. Cuando las partículas entran selectivamente son separadas de la corriente y depositadas sobre un filtro colocado en una superficie oscilante, la variación en la frecuencia de oscilación es proporcional a la masa de las partículas.

O bien mediante el principio de operación de atenuación de radiación beta, el método equivalente es la atenuación en la intensidad de la radiación beta, en el sistema se introduce la muestra de aire mediante una bomba de succión y se depositan las partículas en el filtro, que es una cinta carrete de fibra de vidrio, en ella se hace pasar el haz de la radiación beta de bajo nivel mientras, la capa de partículas, que va en aumento reduce la intensidad del haz en la sección, la cual es medida por una cámara de ionización como detector. La señal eléctrica de salida es igual a la masa real muestreada. La concentración se calcula a partir del aumento temporal de la masa de partículas.

6. MÉTODOS Y MATERIALES

El análisis de las series de tiempo es utilizado para investigar el comportamiento temporal de una variable $x(t)$, para analizar las series de tiempo de las concentraciones de algunos de los contaminantes criterio en la CDMX de acuerdo con los datos del Índice Aire y Salud, antes conocido como Índice Metropolitano de Calidad del Aire (IMECA), con el fin de encontrar ciclos en su comportamiento, épocas de máximos o mínimos, tendencias y un patrón geográfico de la evolución de los contaminantes en la ciudad. Lo anterior para el período comprendido entre 1992 y 2019. Se realizó una limpieza y control de calidad en los datos, posteriormente se aplicaron diferentes herramientas matemáticas para calcular las tendencias de estos, su periodicidad y se realizó un análisis individual por zona en la CDMX y su comportamiento de manera global.

6.1 Análisis auto-espectral

En campos como las Ciencias de la Tierra el análisis espectral puede mostrar periodicidades ocultas en los datos disponibles de diversos fenómenos asociados a comportamientos cíclicos o recurrentes (Stoica y Moses, 2005), por tal motivo aplicar un análisis espectral a la contaminación que se emite en la CDMX mostrará la periodicidad natural que presentan los contaminantes, más allá del comportamiento estudiado respecto a los patrones del viento, procesos de remoción, así como su tiempo de vida en la atmósfera.

Según Trauth (2021), el análisis auto-espectral tiene como objetivo describir la distribución de la varianza contenida en una única señal $x(t)$ en función de la frecuencia o la longitud de onda. Una forma sencilla de describir la varianza de una señal en un intervalo de tiempo k , es con la media de la autocovarianza. Un estimador insesgado de la autocovarianza cov_{xx} de la señal $x(t)$ con N datos muestreados a intervalos de tiempo constantes Δt es:

$$cov_{xx}(k) = \frac{1}{N - k - 1} \sum_{t=1}^{N-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x}) \quad \dots 6-1$$

La serie de autocovarianza claramente depende de la amplitud de $x(t)$. Normalizando la covarianza con la varianza s^2 de $x(t)$, se produce la secuencia de autocorrelación. La autocorrelación consiste en correlacionar una serie de datos consigo mismos en función de un desfase temporal k .

$$corr_{xx}(k) = \frac{cov_{xx}(k)}{cov_{xx}(0)} = \frac{cov_{xx}(k)}{s_x^2} \quad \dots 6-2$$

Un método popularmente utilizado para calcular espectros de potencia en Ciencias de la Tierra es el método introducido por Blackman y Tukey (1958). El método Blackman-Tukey utiliza la transformada compleja de Fourier $X_{xx}(f)$ de la secuencia de autocorrelación $corr_{xx}(k)$,

$$X_{xx}(f) = \sum_{k=0}^M corr_{xx}(k) e^{i2\pi f k / f_s} \quad \dots 6-3$$

donde M es el tiempo máximo de retraso, f_s es la frecuencia de muestreo.

El autoespectro de Blackman-Tukey es igual al valor absoluto de la Transformada de Fourier de la función de autocorrelación. En algunos campos, la Densidad Espectral de Potencia (PSD, por sus siglas en inglés) se utiliza como una forma alternativa de describir el auto-espectro. Por lo tanto, la Densidad Espectral de Potencia de Blackman-Tukey es

$$PSD = \frac{X_{xx}^*(f) X_{xx}(f)}{f_s} = \frac{|X_{xx}(f)|^2}{f_s} \quad \dots 6-4$$

donde $X_{xx}^*(f)$ es el complejo conjugado de la transformada de Fourier de la función de autocorrelación $X_{xx}(f)$

El cálculo actual del Espectro de Potencia sólo se puede realizar en un número finito de frecuencias diferentes empleando una Transformada Rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés), un método para calcular una Transformada de Fourier discreta con un tiempo de ejecución reducido. La mayoría de los algoritmos FFT dividen la transformación en dos partes de tamaño $N/2$ en cada paso de la transformación. Por lo tanto, la transformación se limita a bloques con dimensiones iguales a una potencia del dos. En la práctica, el espectro se calcula usando un número de frecuencias cercano al número de datos en la señal original $x(t)$.

La Transformada discreta de Fourier es una aproximación de la Transformada continua de Fourier. La transformada continua de Fourier asume una señal infinita, pero los datos reales discretos están limitados en ambos extremos, es decir, la amplitud de la señal es cero más allá de cualquier extremo de la serie temporal.

6.2 Serie de Fourier y Transformada rápida de Fourier

Una señal, entendida como la representación matemática de la información contenida en una medición respecto al tiempo o espacio y cuya variable independiente toma cualquier valor real, es decir, es continua (Artés, 2012) puede representarse como una suma infinita de términos de seno y coseno según la teoría de Fourier (Lawrence, 2019).

Aplicar una Transformada Rápida de Fourier a los datos es el fundamento matemático para relacionar la señal de tiempo, con su representación en el dominio de la frecuencia (Lawrence, 2019), tal transformada se representa en la Fig. 6-1.

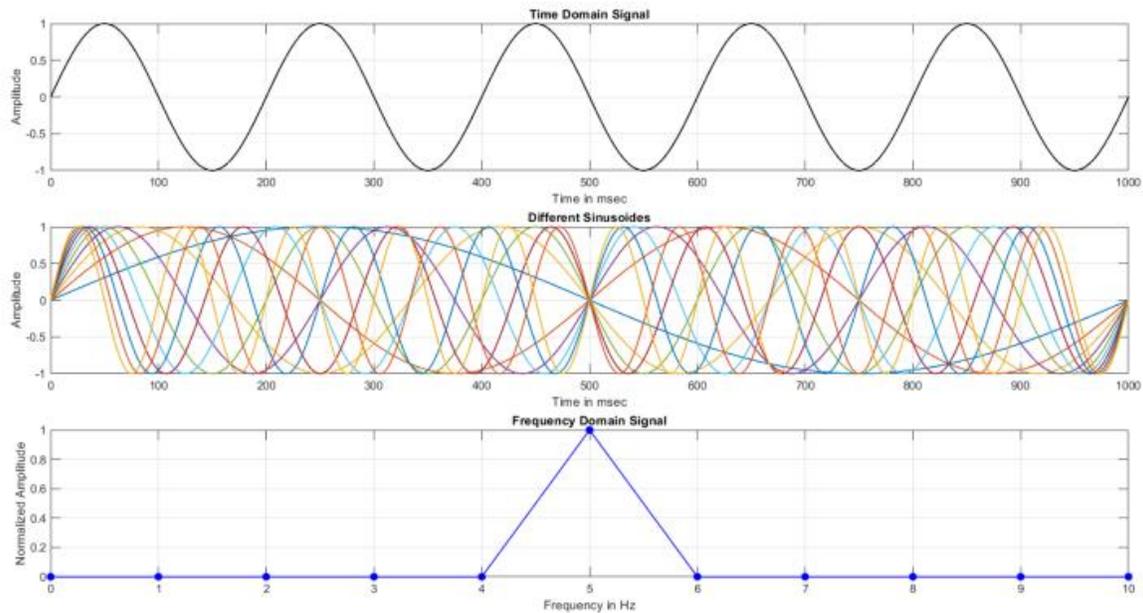


Figura 6-1 Concepto de la Transformada de Fourier (ICHI, 2022).

Dicho esto, la serie de Fourier con periodo T tiene la forma:

$$f(t) = \alpha_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n \cos \frac{2\pi n}{T} t + \beta_n \sin \frac{2\pi n}{T} t \quad \dots 6-5$$

O en su forma trigonométrica

$$f(t) = \alpha_0 + \alpha_1 \cos(w_0 t) + \beta_1 \text{sen}(w_0 t) + \alpha_2 \cos(2w_0 t) + \beta_2 \text{sen}(2w_0 t) + \dots \quad \dots 6-6$$

donde $2\pi/T = w_0$ es la frecuencia fundamental mientras que los múltiplos constantes y futuros $2w_0$ son los armónicos (Chapra et al., 2011), α_n y β_n son los Coeficientes de Fourier.

De acuerdo con Fourier, los coeficientes permiten caracterizar una señal continua en el tiempo con la propiedad de periodicidad, ofreciendo información en el dominio frecuencial y permitiendo reconstruir cualquier señal periódica (González, 2015). Estos coeficientes son constantes y calculados mediante una función $f(t)$ (Chapra et al., 2011).

$$\alpha_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(nw_0 t) dt \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad \dots 6-7$$

$$\beta_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \text{sen}(nw_0 t) dt \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad \dots 6-8$$

6.3 Interpolación

Existen numerosos métodos para interpolar secuencias de datos o series de tiempo con espacios irregulares. El objetivo de estas técnicas de interpolación para datos de $x(t)$ es estimar los valores de x para un vector t equidistante a partir de las mediciones reales de $x(t)$ espaciadas irregularmente.

La interpolación lineal predice los valores de x dibujando una línea recta entre dos mediciones vecinas y calculando el valor de x en el punto apropiado a lo largo de esa línea. Sin embargo, este método tiene sus limitaciones, ya que supone transiciones lineales en los datos, lo que introduce una serie de artificios (incluida la pérdida de componentes de alta frecuencia de la señal) y limita el rango de datos al de las mediciones originales.

La interpolación de spline cúbico es otro método para interpolar datos que están espaciados de manera desigual. Los splines cúbicos son curvas continuas en un intervalo que requieren al menos cuatro puntos de datos para cada paso. El método tiene la ventaja de que conserva la información de alta frecuencia contenida en los datos, sin embargo, los gradientes pronunciados en la secuencia de datos, que normalmente ocurren junto a los mínimos y máximos extremos, podrían causar amplitudes espurias en la serie de tiempo interpolada (Trauth, 2021).

6.4 Base de datos

Las mediciones por cada hora de los contaminantes de interés (Ozono, Dióxido de Azufre, Dióxido de Nitrógeno, Monóxido de Carbono y PM₁₀) de 1992 a 2019 en las cinco zonas de la CDMX (NorOeste, NorEste, Centro, SurOeste, SurEste) se obtuvieron de la página de SEDEMA-Calidad del Aire del Gobierno de la Ciudad de México (<http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aKBhnml=%27&opcion=aw==>).

Se obtuvo un archivo por año en formato *.CSV (indice_year.csv) que contiene la información a cada hora, por zona de la CDMX:

1. Noroeste Ozono, Noroeste Dióxido de Azufre, Noroeste Dióxido de Nitrógeno, Noroeste Monóxido de Carbono, Noroeste PM₁₀
2. Noreste Ozono, Noreste Dióxido de Azufre, Noreste Dióxido de Nitrógeno, Noreste Monóxido de Carbono, Noreste PM₁₀
3. Centro Ozono, Centro Dióxido de Azufre, Centro Dióxido de Nitrógeno, Centro Monóxido de Carbono, Centro PM₁₀
4. Suroeste Ozono, Suroeste Dióxido de Azufre, Suroeste Dióxido de Nitrógeno, Suroeste Monóxido de Carbono, Suroeste PM₁₀
5. Sureste Ozono, Sureste Dióxido de Azufre, Sureste Dióxido de Nitrógeno, Sureste Monóxido de Carbono, Sureste PM₁₀

De 1992 a 1998, las mediciones se registraban de las 7 a las 21 horas, a partir de 1999 se tienen registros cada 24 horas. En 1995 se comienza a reportar las mediciones de las PM₁₀ en esta base de datos. Cuando no existe una medición, la celda aparece vacía.

7. DESARROLLO

Para poder analizar las series de tiempo de los contaminantes se tuvo que realizar una organización, limpieza y control de calidad de los datos.

Primero, se encontraron las fechas en que comenzaron a operar los sistemas de medición de cada contaminante, ya que como se vio en la sección 5.5, la implementación de equipos que midieran la concentración de los contaminantes no fue simultánea, sino paulatina hasta llegar a tener una red de monitoreo como la RAMA y una base de datos confiable de los principales contaminantes o los contaminantes criterio.

Después, a las series de tiempo de los datos originales de la RAMA se les hizo una limpieza de datos sospechosos y anómalos (fuera de los rangos creíbles) o cuyo valor correspondía a un valor en el momento en que no había una medición dado que a pesar de que hay 24 mediciones por día durante los 27 años de estudio, en los primeros años de operación de la red, el sistema sólo operaba para ciertas horas del día.

Posteriormente, para la determinación del control de calidad se calculó la desviación estándar asociada a la serie de cada contaminante, se detectaron valores de dos desviaciones estándar (fuera del intervalo de confianza) y estos datos sospechosos se comparaban con el valor del tiempo inmediato anterior y posterior, si se observaba que estos tres puntos tenían una tendencia se mantenía el valor, en caso contrario se eliminaba el valor para que posteriormente fuera rellenado mediante la interpolación lineal (Fig. 7-1).

Finalmente, se obtuvieron las series de tiempo de cada hora (sin datos faltantes) durante los 27 años de estudio, correspondientes a cada contaminante por zona de la CDMX.

Días \ Horas	1	2	...	365	365
1					
2		→			
3	interpolación				
4					
...					
23					
24					

Figura 7-1 Esquema en que se realizó la interpolación de los datos, de acuerdo con el valor a cierta hora para todos los días del año.

A continuación, se organizaron los datos para poder analizar:

- ❖ La tendencia a lo largo de todo el periodo de estudio
- ❖ El comportamiento de los contaminantes para cada hora del día
- ❖ El comportamiento de los contaminantes para cada mes del año

Finalmente, se realizó un análisis auto-espectral de las series de tiempo (específicamente de la horaria) de cada contaminante en cada zona de la CDMX, mediante la metodología de la Transformada Rápida de Fourier obteniendo el dominio frecuencial y la periodicidad característica en los 27 años de estudio.

8. RESULTADOS

Los análisis del comportamiento de los principales contaminantes atmosféricos medidos por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico RAMA en la Ciudad de México por zonas dio como resultado lo siguiente.

8.1 Ozono (O₃)

8.1.1 Comportamiento histórico, diario y anual

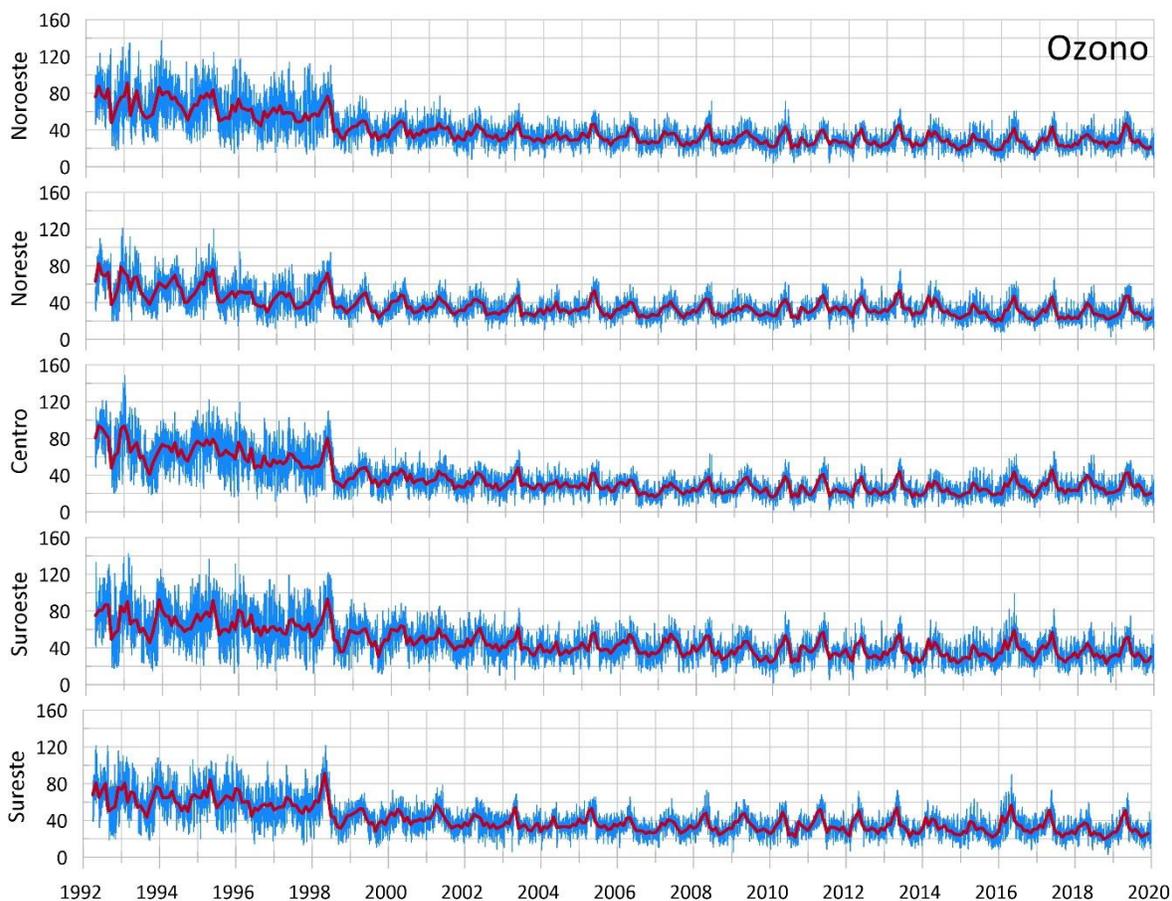


Figura 8-1 Promedio diario (azul) y mensual (rojo) de la concentración histórica en [ppb] del Ozono de 1992 a 2019 en las 5 zonas de la CDMX.

En la Fig. 8-1, entre 1992 y 1998 se tienen las mayores concentraciones de Ozono: los promedios diarios oscilaban entre 140 y 20 ppb, y los promedios mensuales entre 100 y 40 ppb. Posteriormente, en 1998 se tuvo un pico de contaminación, el cuál es más notorio en las zonas Centro, Suroeste y Sureste; después de esta fecha se observa una disminución en la concentración del Ozono en las 5 regiones, quedando acotada a una oscilación de los promedios diarios entre 80 y 20 ppb y los promedios mensuales entre 60 y 20 ppb.

En general, el comportamiento histórico de la concentración de Ozono muestra una disminución en sus valores. En los últimos años, las zonas que presentan las mayores concentraciones de Ozono son la Suroeste y Sureste; mientras que las que presentan las menores concentraciones son la Centro y Noroeste.

- ❖ En la zona Noroeste la disminución del promedio de la concentración fue del 78%.
- ❖ En la zona Noreste la disminución del promedio de la concentración en todo el periodo de estudio fue del 74%.
- ❖ En la zona Centro la disminución total fue del 80% considerando la concentración más alta de 1992 y la del 2019.
- ❖ En la zona Suroeste el promedio de la concentración tuvo una disminución del 66% del primer al último año de estudio.
- ❖ En la zona Sureste se tuvo una disminución total del promedio de la concentración de 66%.

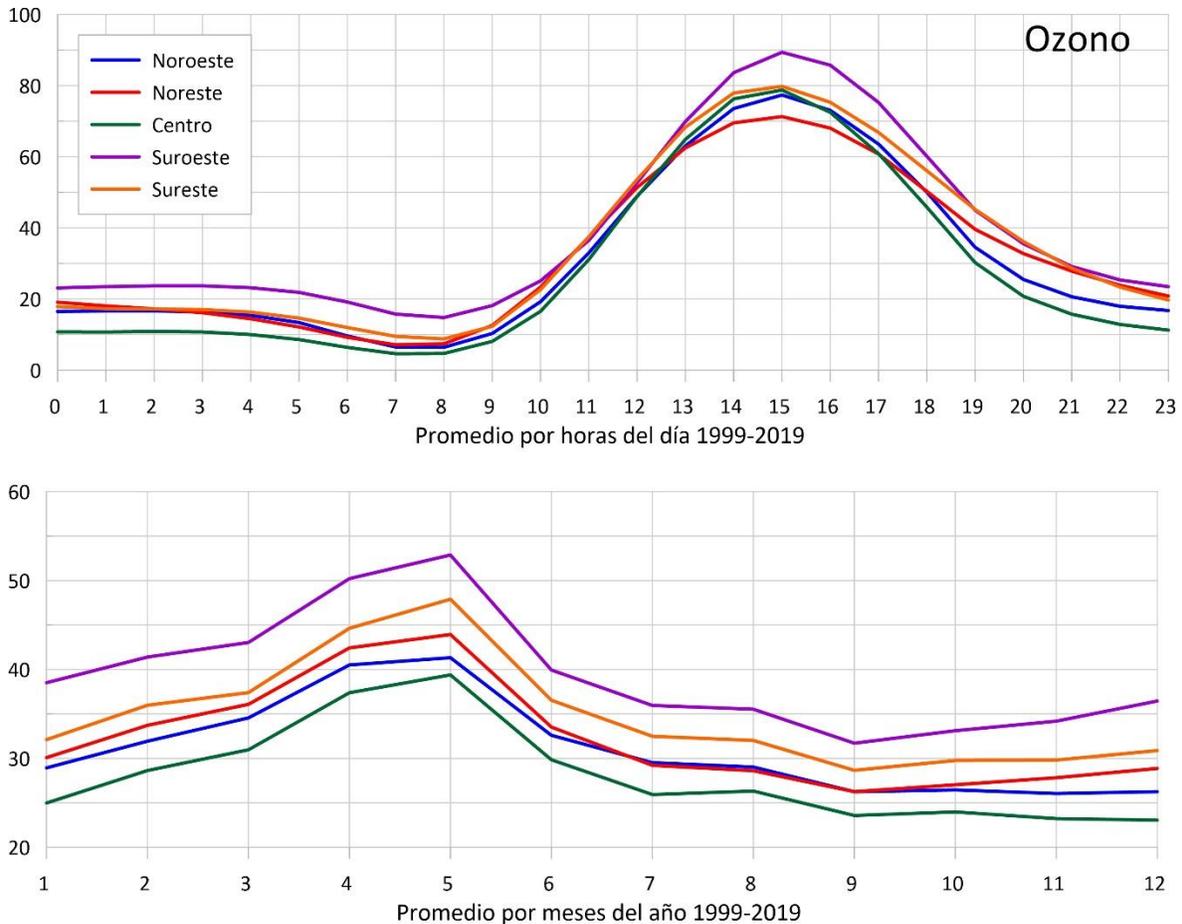


Figura 8-2 Comportamiento diario de los promedios por hora (panel superior) y comportamiento anual de los promedios mensuales (panel inferior) de la concentración en [ppb] del Ozono de 1992 a 2019 en las 5 zonas de la CDMX.

Al hacer el análisis de los promedios por hora (Fig. 8-2, parte superior), se observa un mínimo de concentración en todas las zonas cerca de las 8 horas, posteriormente las concentraciones aumentan (momento en el cual los NO_x disminuyen luego de participar en las reacciones fotolíticas para la formación de Ozono) hasta alcanzar un máximo cerca de las 15 horas como resultado del apogeo de la luz solar disponible, con valores entre 90 y 70 ppb, para finalmente disminuir y alcanzar valores casi constantes de concentraciones menores a 30 ppb de las 21 horas hasta las 6 horas del siguiente día.

En cuanto al comportamiento de los promedios mensuales (Fig. 8-2, parte inferior), se observa que en todas las zonas de la CDMX se presentan los valores más altos en la

concentración de Ozono de marzo a junio, alcanzando los valores máximos en mayo entre 55 y 35 ppb, lo cual corresponde a la temporada de Ozono (febrero-junio). Por otro lado, de agosto a diciembre se tienen los valores más bajos, aunque es septiembre el que presenta la concentración mínima.

Al analizar los comportamientos diarios y anuales de las concentraciones de Ozono, se observa que al igual que en el comportamiento histórico, la zona Suroeste es la que registra la mayor concentración de contaminante, mientras que la zona Centro es la que registra la menor concentración.

8.1.2 Análisis espectral

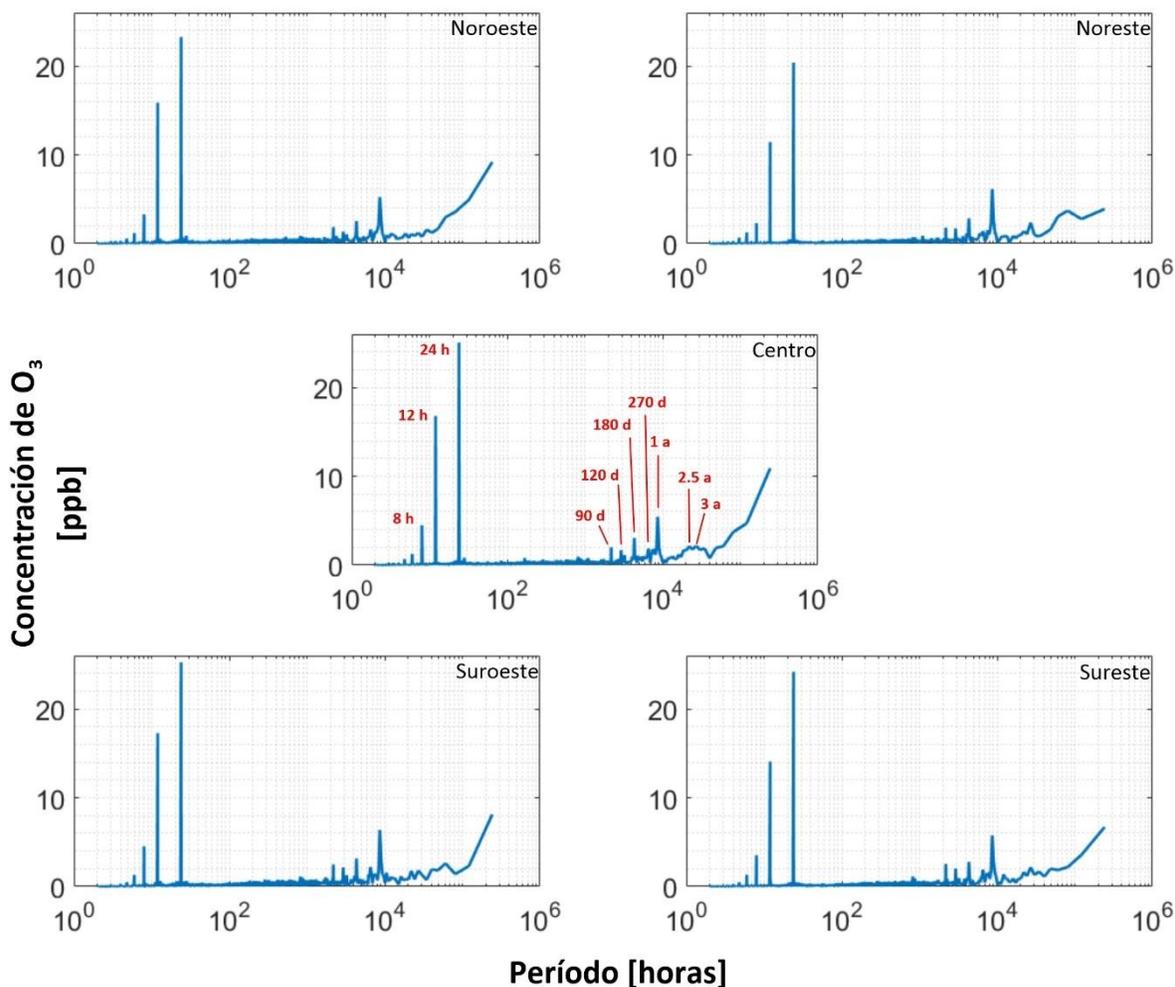


Figura 8-3 Espectro de frecuencia obtenido por medio de la FFT para la concentración en [ppb] del Ozono de 1992 a 2019 en las 5 zonas de la CDMX (h = horas, d = días, a = años).

Al hacer el análisis espectral (Fig. 8-3) se observa que las series de concentraciones del Ozono tienen un comportamiento periódico. Las componentes con una periodicidad de 12 y 24 horas son las más importantes, mientras que las componentes de 3, 6 y 12 meses aparecen en las series, pero contribuyendo con una menor amplitud en la concentración final, lo cual es una manifestación de que la química atmosférica permite que éste se agote y vuelva a

generar continuamente por medio de las reacciones químicas con otros compuestos en su fase gaseosa y los procesos de remoción como la precipitación o su depositación en superficie.

La amplitud de la componente más importante es mayor en las zonas Suroeste, Centro y Sureste que, en las zonas Noreste y Noroeste.

8.2 Dióxido de Azufre (SO₂)

8.2.1 Comportamiento histórico, diario y anual

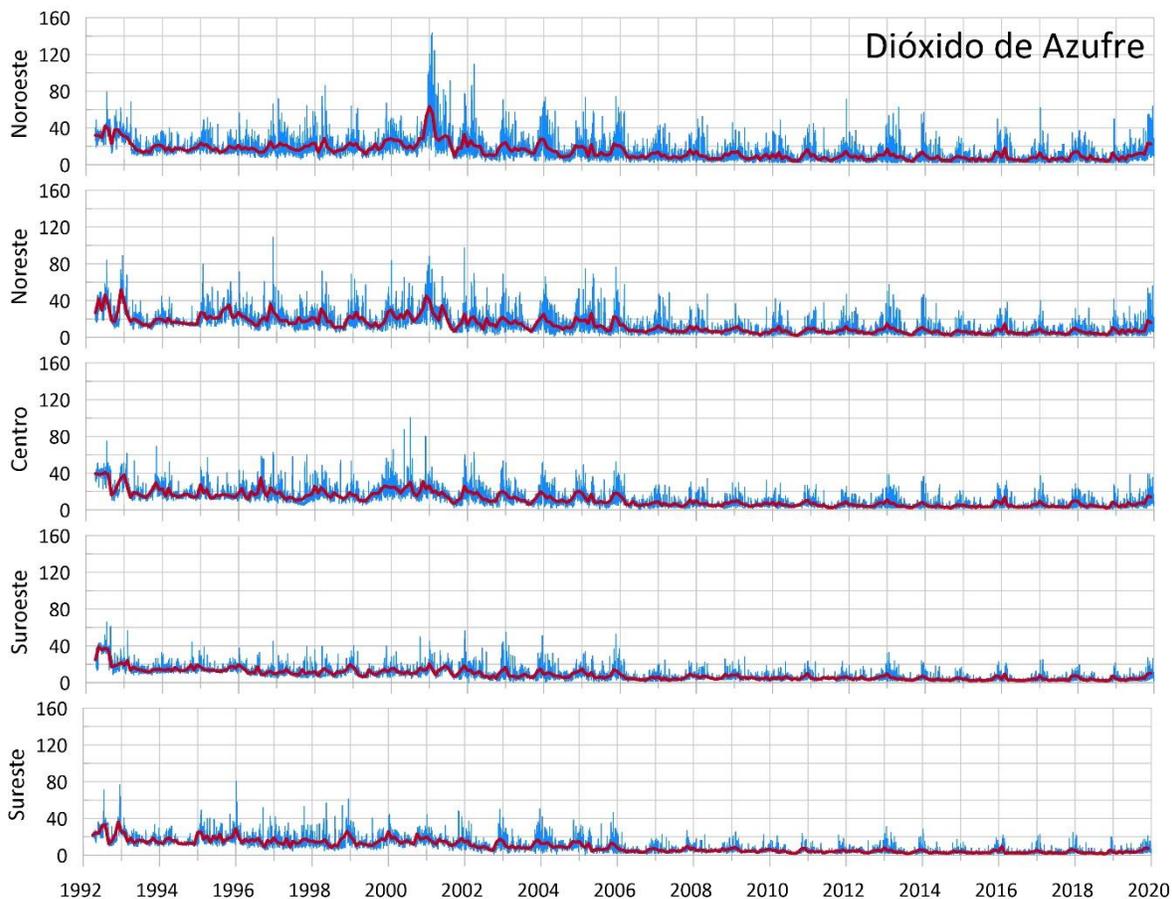


Figura 8-4 Promedio diario (azul) y mensual (rojo) de la concentración histórica en [ppb] del Dióxido de Azufre de 1992 a 2019 en las 5 zonas de la CDMX.

En la Fig. 8-4, se observa que el comportamiento histórico del Dióxido de Azufre en las 5 zonas de la CDMX no tiene un marcado descenso a lo largo del periodo de estudio, aunque la concentración promedio mensual es fluctuante, es suave, a excepción de las zonas Noroeste y Noreste que presentaron un pico muy notable cerca del año 2001, posterior al 2006 las fluctuaciones son menos evidentes, por lo que la concentración promedio mensual se ve casi constante por ejemplo en las zonas Sureste y Suroeste, además en estas zonas el promedio

diario tampoco presenta grandes fluctuaciones como las demás (en especial la Noroeste que tiene muchos crecimientos súbitos). Al analizar los promedios mensuales, se puede observar que de 1992 a 2001 la concentración oscilaba entre 50 y 10 ppb, en 2001 entre 60 y 10 ppb y a partir del 2006 comienza una disminución en los valores de la concentración, el cual llega casi a un estado de equilibrio oscilando entre 20 y 0 ppb.

A pesar de que el promedio mensual ha disminuido, al analizar los promedios diarios se sigue observando el mismo comportamiento de crecimientos súbitos, sólo que entre el 2006 y 2019 el periodo en que se presentan estos crecimientos en el año es menor que los que se observan entre 1992 y 2006.

Las zonas que presentan las mayores concentraciones históricas de Dióxido de Azufre son la Noroeste y Noreste, mientras que las que presentan las menores concentraciones son la Suroeste y Sureste.

- ❖ En la zona Noroeste todo el periodo de estudio muestra una disminución total casi del 45% si comparamos el último valor del 2019 respecto al primer valor del primer año (1992).
- ❖ En la zona Noreste la concentración promedio disminuyó un 57% del primer al último año.
- ❖ En la zona Centro la reducción total de la concentración promedio fue del 65%.
- ❖ En la zona Suroeste el promedio de la concentración total disminuyó aproximadamente 74%.
- ❖ En la zona Sureste la concentración promedio de la zona disminuyó en los 27 años un 79%.

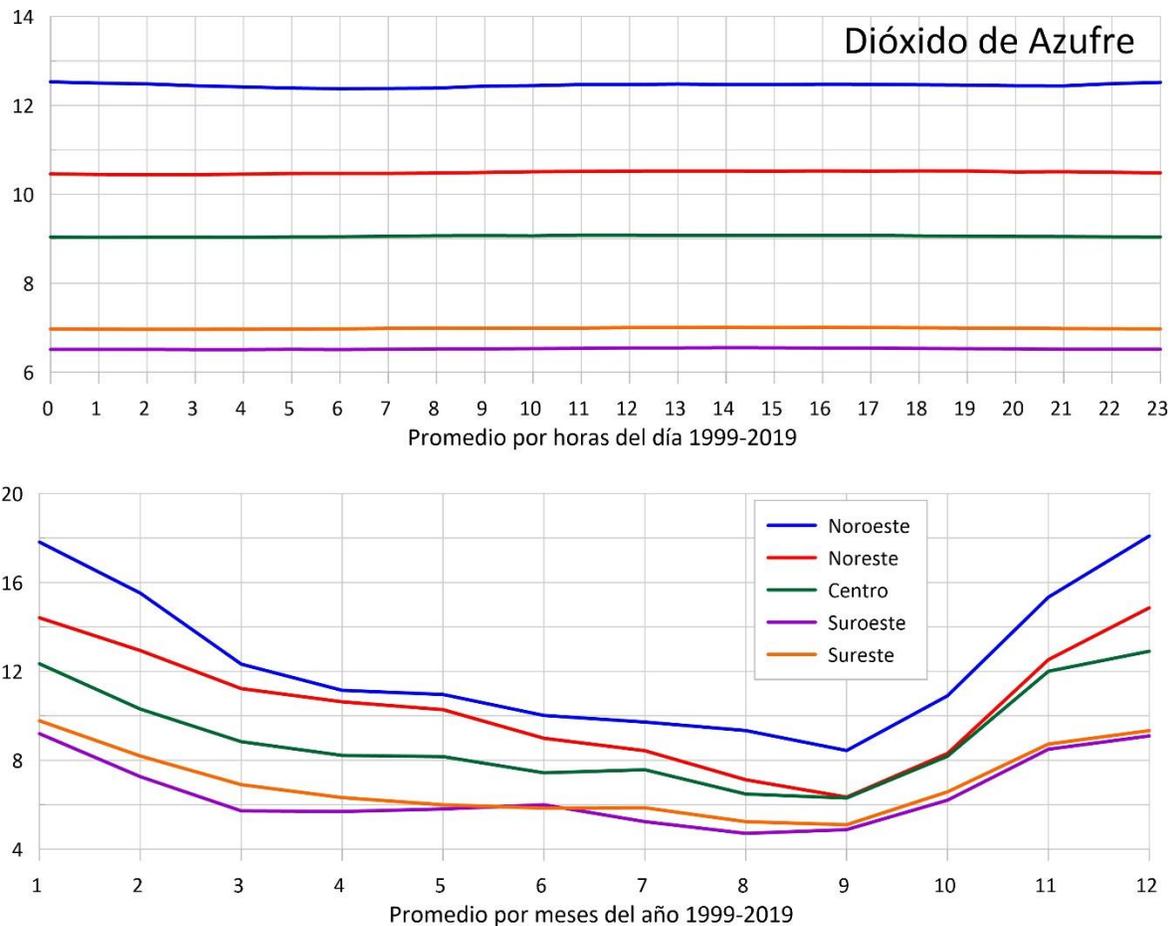


Figura 8-5 Comportamiento diario de los promedios por hora (panel superior) y comportamiento anual de los promedios mensuales (panel inferior) de la concentración en [ppb] del Dióxido de Azufre de 1992 a 2019 en las 5 zonas de la CDMX.

Al hacer el análisis de los promedios por hora (Fig. 8-5, panel superior), no se observa un cambio significativo en los valores de las concentraciones, estos prácticamente tienen un valor constante durante las 24 horas del día.

En cuanto al comportamiento de los promedios mensuales (Fig. 8-5, panel inferior), se observa que en todas las zonas de la CDMX se presentan los valores más altos de concentración de Dióxido de Azufre de octubre a marzo, alcanzando los valores máximos en diciembre-enero (entre 18 y 8 ppb). Por otro lado, de marzo a octubre se tienen los valores más bajos, registrando el mínimo en septiembre, excepto en la zona Suroeste pues allí el mínimo es en agosto.

Al analizar los comportamientos diarios y mensuales de las concentraciones de Dióxido de Azufre, se observa que al igual que en el comportamiento histórico, la zona Noroeste es la que registra la mayor concentración del contaminante, mientras que las zonas Suroeste y Sureste son las que registran las menores concentraciones.

8.2.2 Análisis espectral

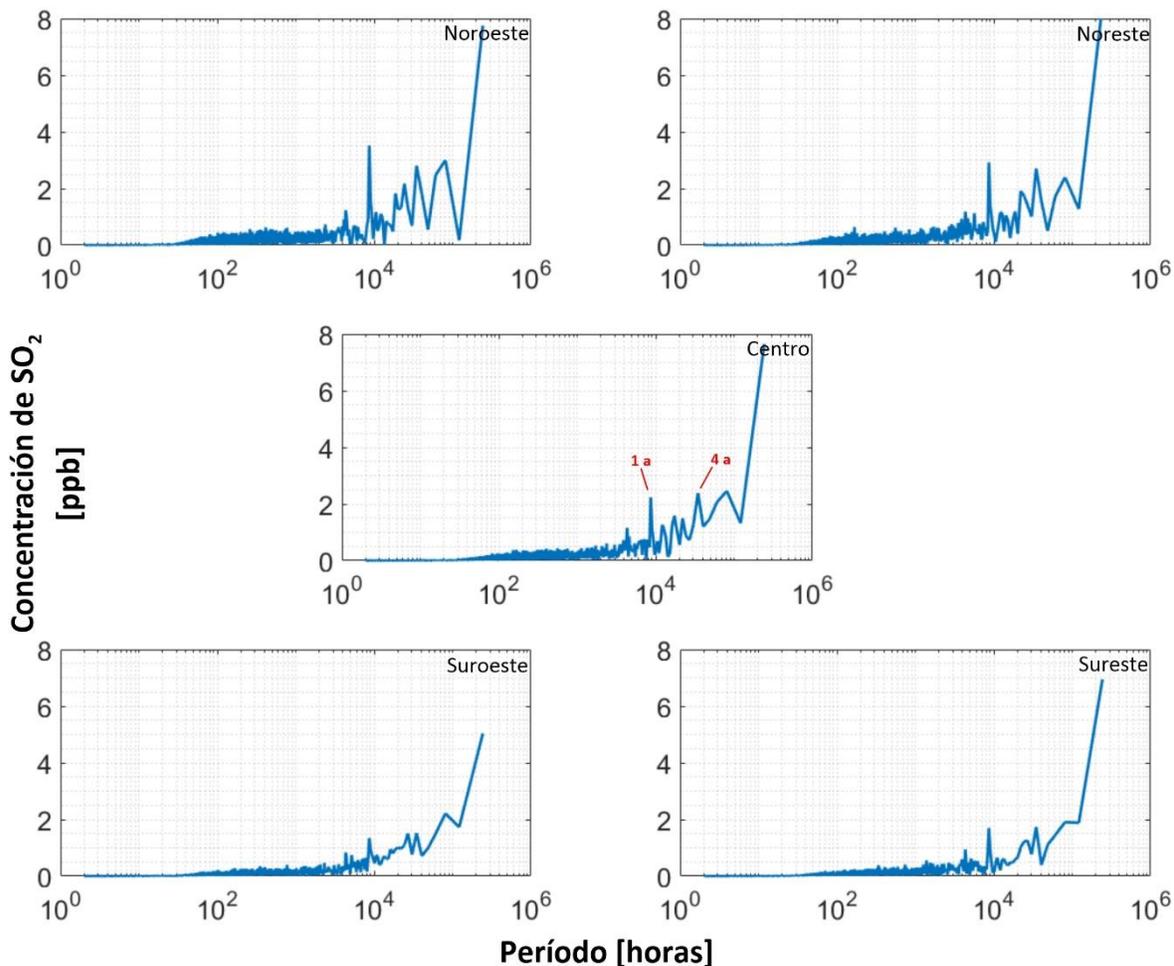


Figura 8-6 Espectro de frecuencia obtenido por medio de la FFT para la concentración en [ppb] del Dióxido de Azufre de 1992 a 2019 en las 5 zonas de la CDMX (h = horas, d = días, a = años).

Al hacer el análisis espectral (Fig. 8-6) se observa que las series de concentraciones del Dióxido de Azufre tienen un comportamiento periódico, donde las componentes más importantes son la de 1 y 4 años, teniendo una amplitud mayor en la zona Noreste y Noroeste, que en la Centro, Sureste y Suroeste.

8.3 Dióxido de Nitrógeno (NO₂)

8.3.1 Comportamiento histórico, diario y anual

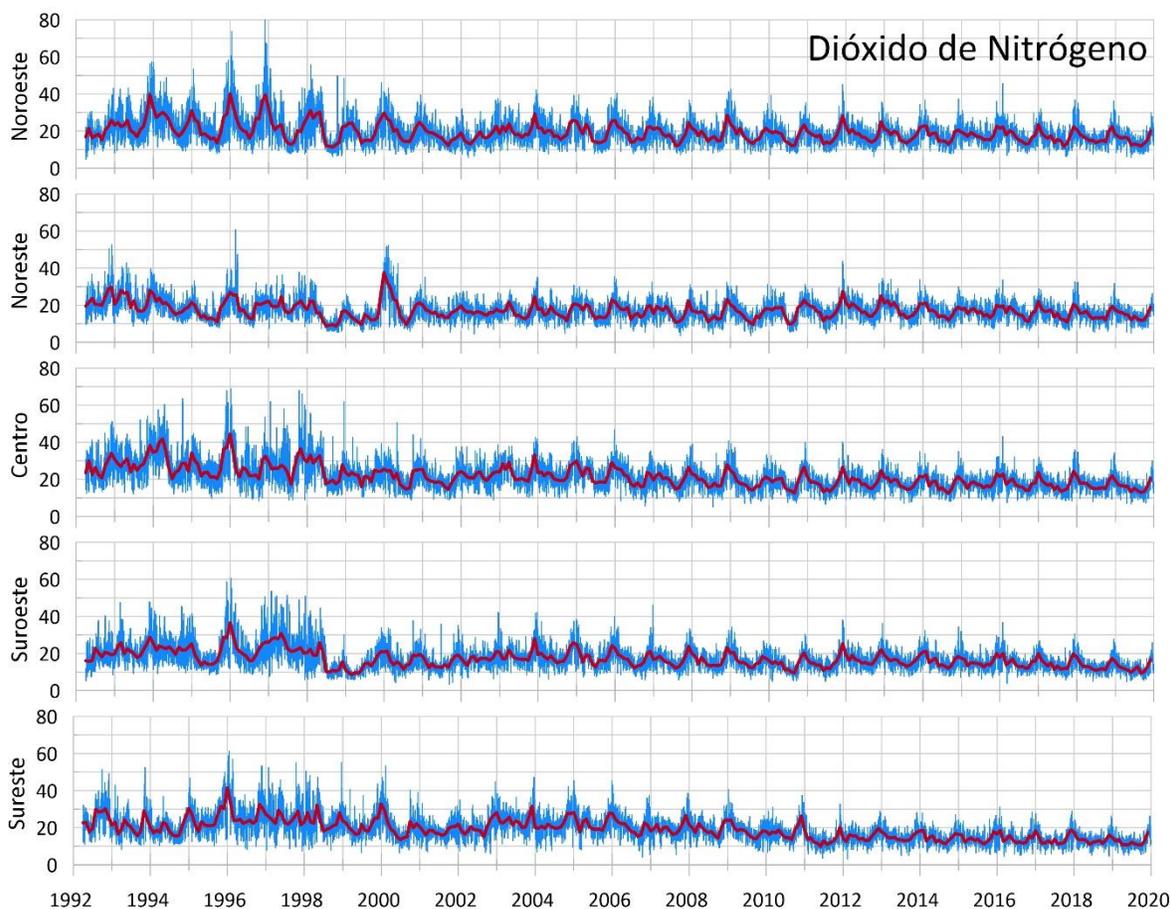


Figura 8-7 Promedio diario (azul) y mensual (rojo) de la concentración histórica en [ppb] del Dióxido de Nitrógeno de 1992 a 2019 en las 5 zonas de la CDMX.

En la Fig. 8-7, se observa un comportamiento prácticamente similar en las 5 zonas de la CDMX, en todas se observan épocas de máximos bastante significativos. En los promedios mensuales de la concentración de Dióxido de Nitrógeno se observa que antes del 2001 los valores oscilaban entre 40 y 10 ppb; y posteriormente se acotaron entre 30 y 10 ppb, es decir, aunque hubo una disminución no es tanta. Sin embargo, los picos de los promedios diarios de concentración en años recientes (acotados entre 30 y cercanos a 0 ppb) no llegan a ser tan altos como antes del 2001(acotados entre 80 y 10 ppb), aunque siguen siendo significativos

y se presentan por igual en las 5 zonas. En este caso no es claro cuáles son las zonas con mayor y menor contaminación, todas presentan concentraciones muy similares en los últimos años de estudio.

- ❖ En la zona Noroeste la concentración decreció casi un 6 % durante todo el lapso de estudio.
- ❖ En la zona Noreste la concentración disminuyó de 23.7 en el primer año a 18.9 en el 2019, es decir, casi un 20%.
- ❖ En la zona Centro el promedio de concentraciones tuvo una disminución del 32.2 % considerando el valor del primer año contra el del último año.
- ❖ En la zona Suroeste la reducción general en todo el periodo de estudio dio como resultado un 31%.
- ❖ En la zona Sureste la disminución del promedio fue de un 24%.

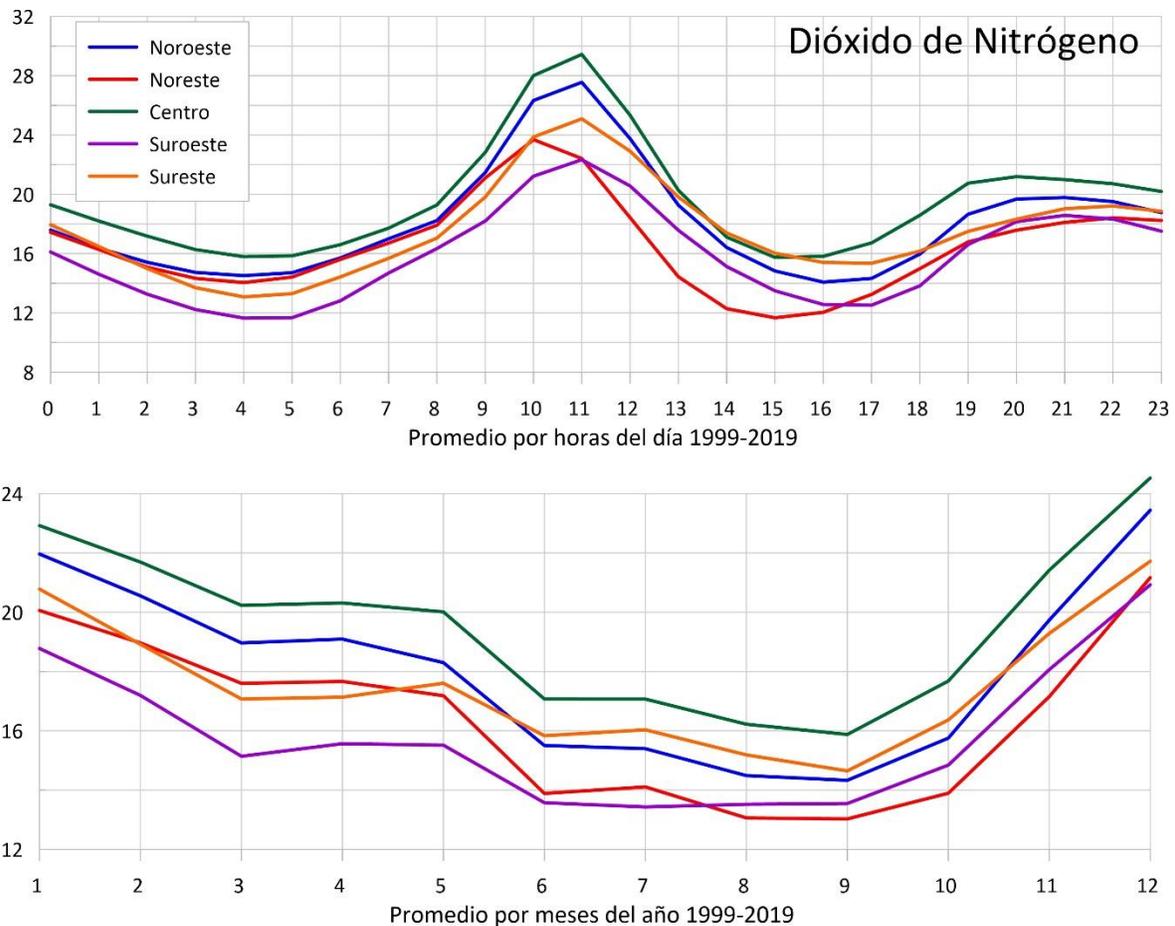


Figura 8-8 Comportamiento diario de los promedios por hora (panel superior) y comportamiento anual de los promedios mensuales (panel inferior) de la concentración en [ppb] del Dióxido de Nitrógeno de 1992 a 2019 en las 5 zonas de la CDMX.

Al hacer el análisis de los promedios por hora (Fig. 8-8, panel superior), se observa un comportamiento bimodal. El primer y mayor máximo se da de las 8 a las 13 horas, alcanzando la concentración más alta alrededor de las 11 horas con valores entre 30 y 22 ppb. El segundo máximo se da entre las 18 horas y la 1 hora del día siguiente con valores entre 21 y 17 ppb.

En cuanto al comportamiento de los promedios mensuales (Fig. 8-8, panel inferior), se observa que en todas las zonas de la CDMX se presentan los valores más altos en la concentración de Dióxido de Nitrógeno de noviembre a febrero, alcanzando los máximos en

diciembre, con valores entre 25 y 21 ppb. Por otro lado, de junio a octubre se tienen los valores más bajos, alcanzando el mínimo en septiembre.

Al analizar los comportamientos diarios y anuales de las concentraciones de Dióxido de Nitrógeno, se observa que las zonas Centro y Noroeste son las que registran las mayores concentraciones, y las zonas Suroeste y Noreste las que registran las menores concentraciones.

8.3.2 Análisis espectral

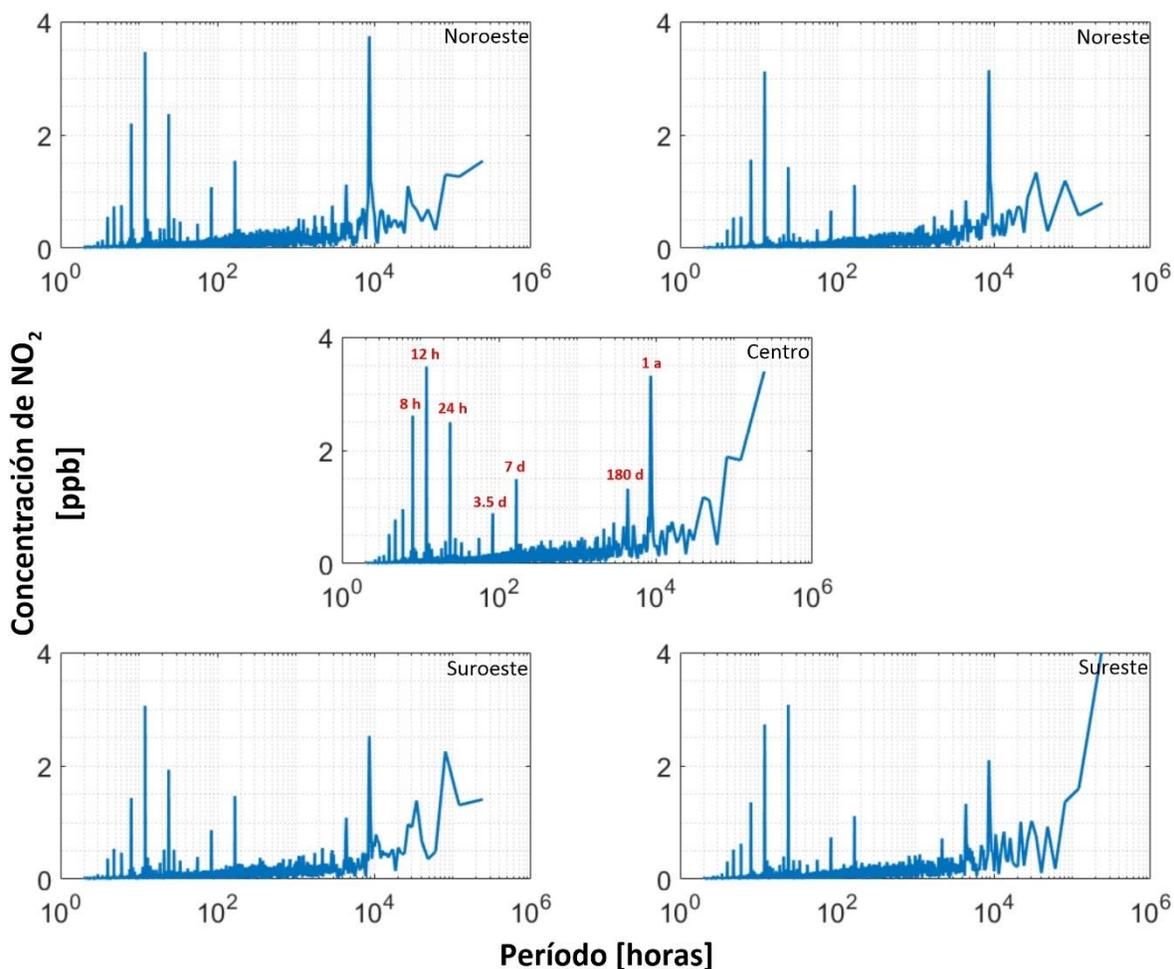


Figura 8-9 Espectro de frecuencia obtenido por medio de la FFT para la concentración en [ppb] del Dióxido de Nitrógeno de 1992 a 2019 en las 5 zonas de la CDMX (h = horas, d = días, a = años).

Al hacer el análisis espectral (Fig. 8-9) se observa que las series de concentraciones del Dióxido de Nitrógeno tienen un comportamiento periódico. Las componentes con una periodicidad de 8, 12 y 24 horas, junto con la de 1 año son las más importantes, aunque también se observa el aporte de una componente con periodo de media y una semana. En las zonas Noreste y Noroeste, la componente anual y la de 12 horas tienen casi la misma amplitud, mientras que, en las demás zonas, la componente dominante es la de las 12 horas.

8.4 Monóxido de Carbono (CO)

8.4.1 Comportamiento histórico. diario y anual

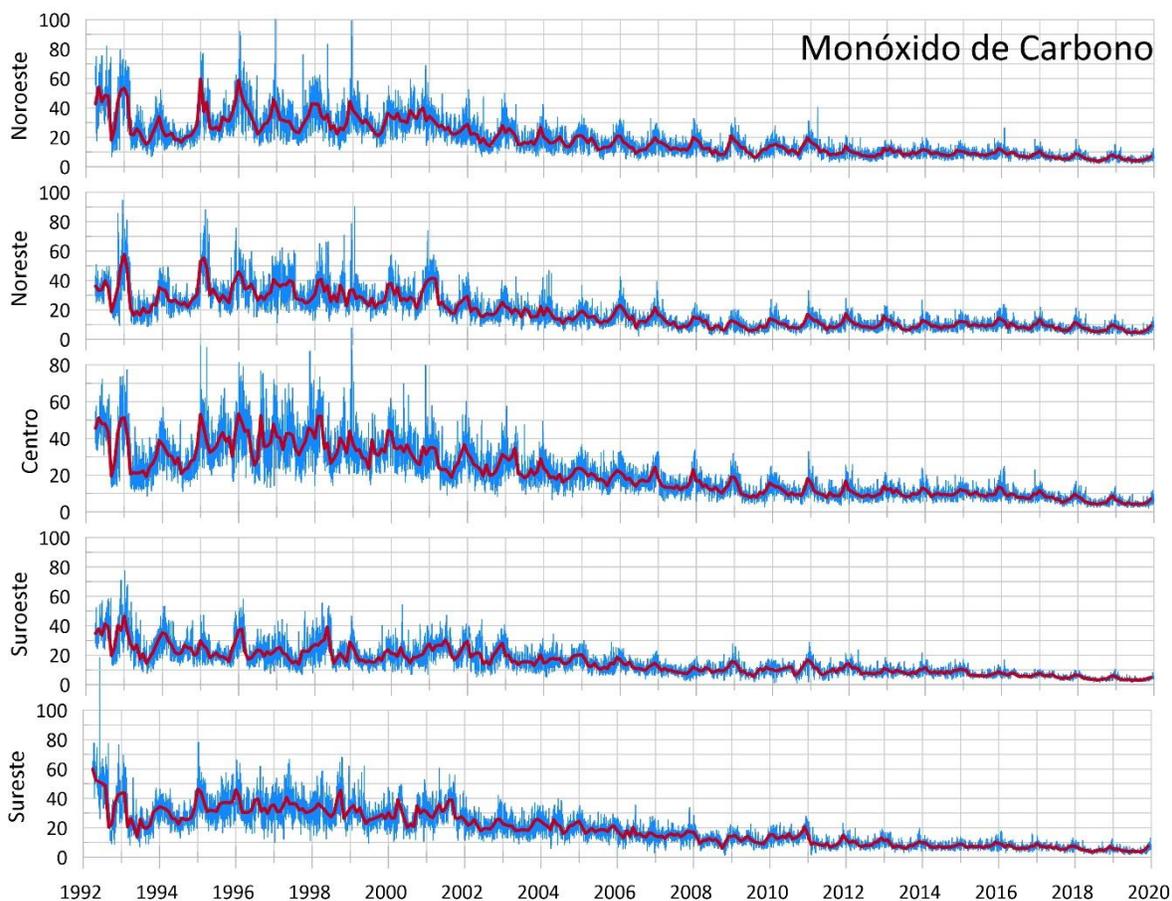


Figura 8-10 Promedio diario (azul) y mensual (rojo) de la concentración histórica en [ppm] del Monóxido de Carbono de 1992 a 2019 en las 5 zonas de la CDMX.

En la Fig. 8-10, se observa un gran cambio en la concentración del Monóxido de Carbono de los valores que presentaba entre 1992 y 2004 (promedio diario de concentración entre 100 y 10 ppm, y promedios mensuales entre 60 y 10 ppm) y los que se presentan del 2011 al 2019 (el promedio diario de concentración está entre 30 y 0 ppm, y los promedios mensuales entre 20 y 0 ppm).

En general, las zonas que presentan las mayores concentraciones de Monóxido de Carbono son la Centro y Noreste, mientras que las que presentan las menores concentraciones son la Suroeste y Sureste.

- ❖ En la zona Noroeste la disminución general de todo el periodo fue de 88% aproximadamente, tomando el valor inicial y el último de toda la tendencia, el pico más alto ocurrió en 1995 y 1996.
- ❖ En la zona Noreste la disminución de la concentración en todo el periodo de estudio fue de 73% aproximadamente.
- ❖ En la zona Centro la concentración disminuyó un 86.4% considerando el valor de la concentración inicial con el del final.
- ❖ En la zona Suroeste la disminución total fue de 84.19% tomando el valor inicial y el final de todo el periodo de estudio.
- ❖ En la zona Sureste la disminución total de la zona fue de 88%.

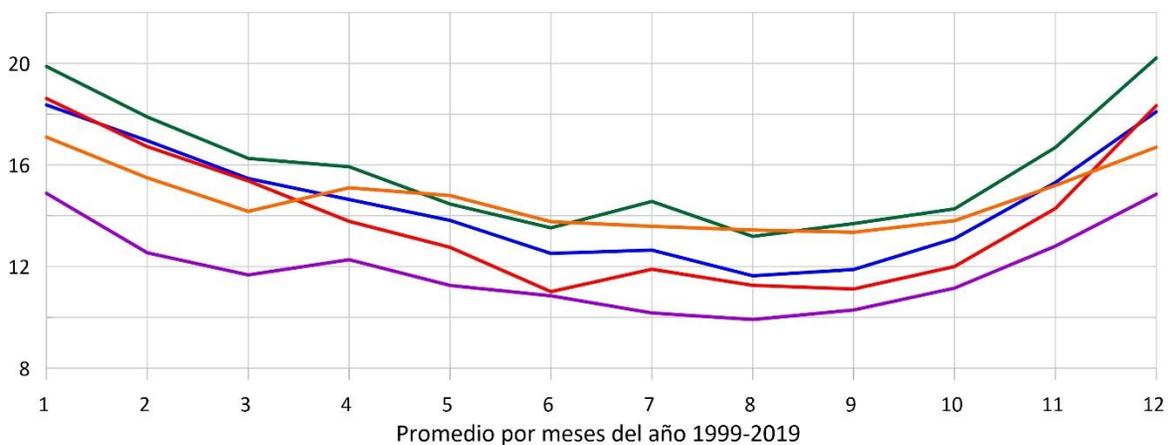
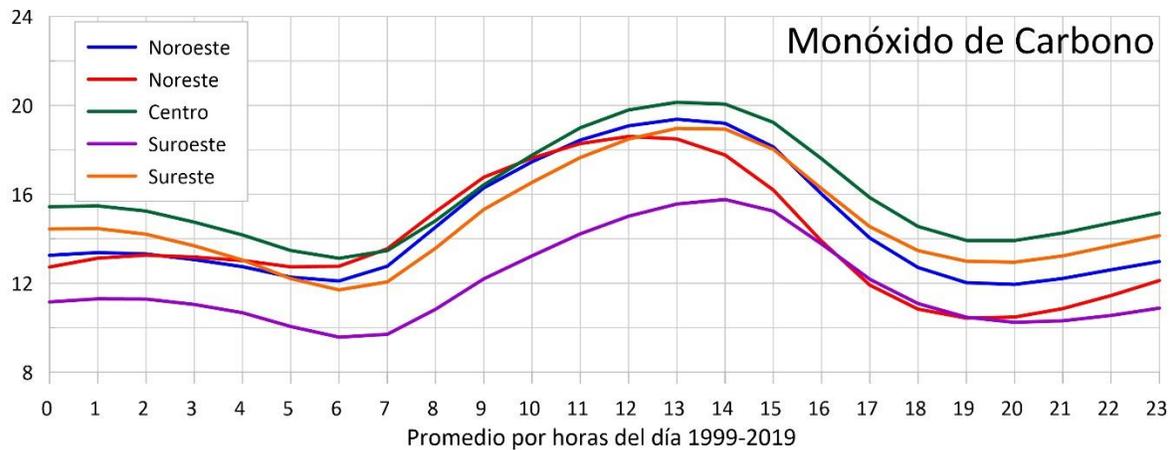


Figura 8-11 Comportamiento diario de los promedios por hora (panel superior) y comportamiento anual de los promedios mensuales (panel inferior) de la concentración en [ppm] del Monóxido de Carbono de 1992 a 2019 en las 5 zonas de la CDMX.

Al hacer el análisis de los promedios por hora (Fig. 8-11, panel superior), se observa un comportamiento bimodal. El primer y mayor máximo se da de las 8 a las 17 horas, alcanzando la concentración más alta de las 12 a las 14 horas, con valores entre 20 y 16 ppm. El segundo máximo se da entre las 21 horas y las 4 del día siguiente, con valores entre 11 y 16 ppm. Los mínimos se registran entre las 6 y 7 horas y entre las 19 y 20, con valores entre 10 y 13 ppm.

En cuanto al comportamiento de los promedios mensuales (Fig. 8-11, panel inferior), se observa que en todas las zonas de la CDMX se presentan los valores más altos en la concentración de Monóxido de Carbono de noviembre a febrero, alcanzando los valores

máximos en diciembre-enero, entre 20 y 14 ppm. Por otro lado, de junio a octubre se tienen los valores más bajos, entre 9 y 14 ppm.

Al analizar los comportamientos diarios y mensuales de las concentraciones de Monóxido de Carbono se observa que en general la zona Centro es la que presenta las mayores concentraciones, por otro lado, la zona con menor concentración de contaminante es la Suroeste.

8.4.2 Análisis espectral

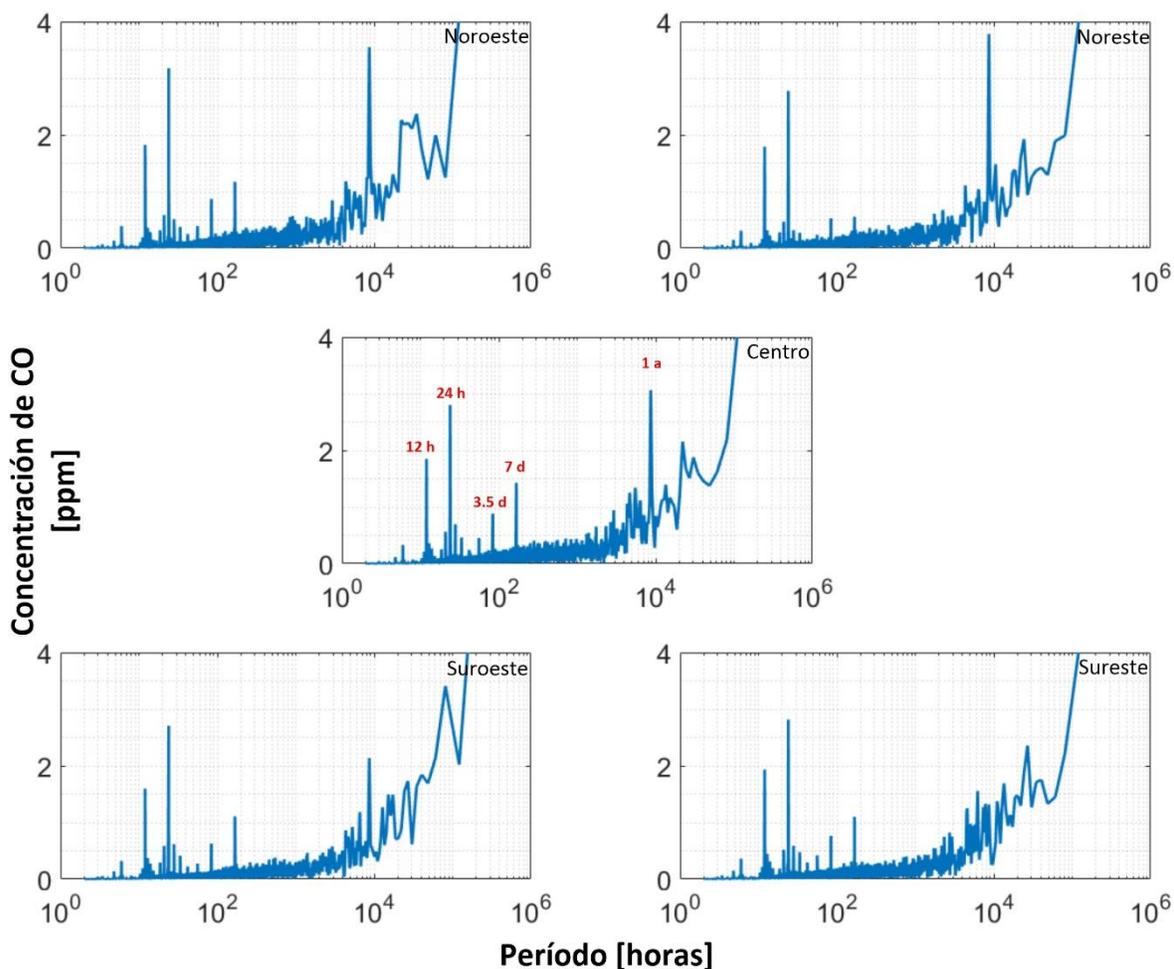


Figura 8-12 Espectro de frecuencia obtenido por medio de la FFT para la concentración en [ppm] del Monóxido de Carbono de 1992 a 2019 en las 5 zonas de la CDMX (h = horas, d = días, a = años).

Al hacer el análisis espectral (Fig. 8-12) se observa que las series de concentraciones del Monóxido de Carbono tienen un comportamiento periódico. Las componentes con una periodicidad de 12 y 24 horas, junto con la de 1 año son las más importantes, aunque también se observa el aporte de una componente con periodo de media y una semana. En las zonas Noreste, Noroeste y Centro, la componente anual es la más importante, mientras que en la zona Sureste y Suroeste las componentes de 12 y 24 horas son las dominantes.

8.5 Material particulado PM₁₀

8.5.1 Comportamiento histórico, diario y anual

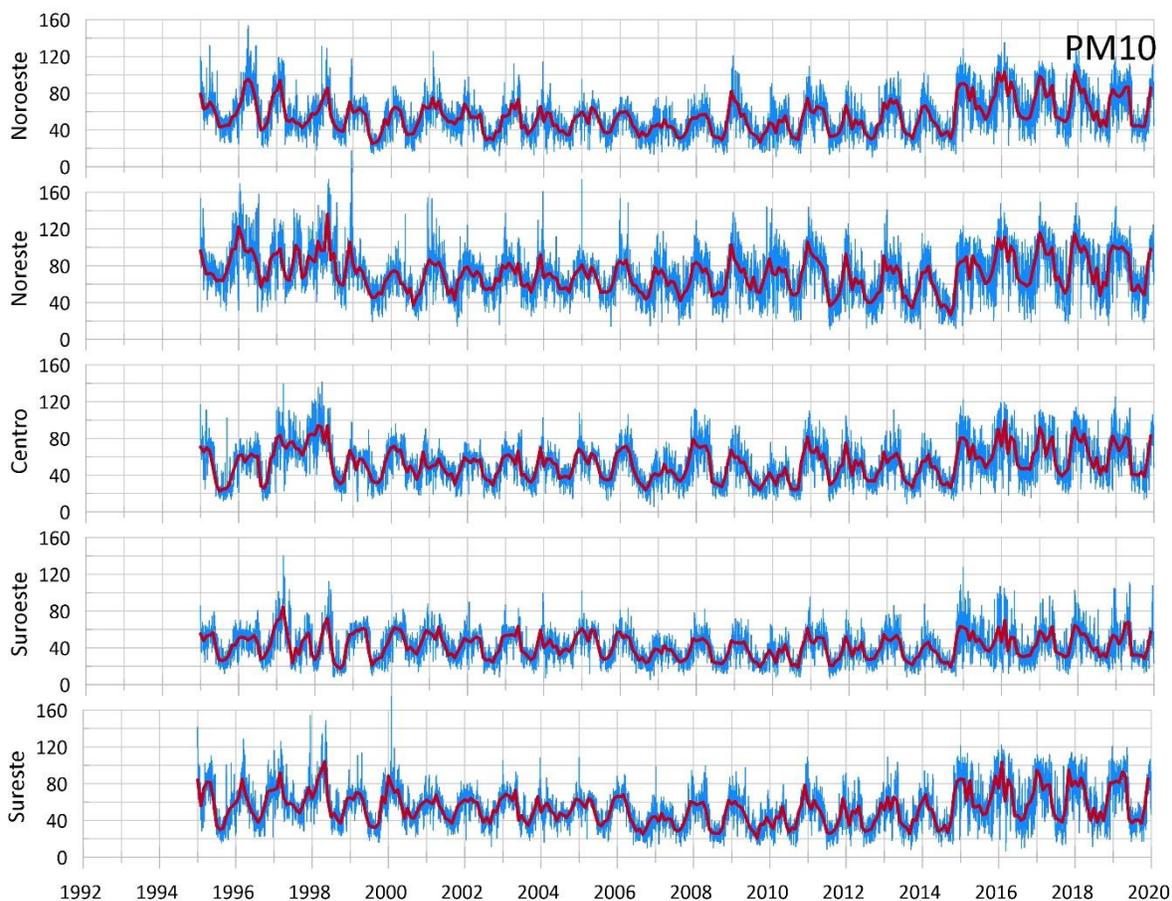


Figura 8-13 Promedio diario (azul) y mensual (rojo) de la concentración histórica en $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ del Material Particulado PM₁₀ de 1995 a 2019 en las 5 zonas de la CDMX.

En la Fig. 8-13, se observa que las concentraciones promedio mensuales del material particulado PM₁₀ entre 1995 y 2001 oscilaban entre 140 y 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, posteriormente, de 2001 al 2015 se tuvo una disminución en las concentraciones con oscilaciones entre 80 y 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sin embargo, del 2015 a 2019 se tuvo un aumento en la concentración del contaminante, oscilando entre 120 y 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Las fluctuaciones del promedio diario son mucho más evidentes sobre todo en las zonas Noroeste y Noreste.

A diferencia de los demás contaminantes, la Materia Particulada PM_{10} no ha tenido un marcado descenso, sino lo contrario. En general, las zonas que presentan las mayores concentraciones de Material Particulado PM_{10} son la Noreste y Noroeste, mientras que la que presenta la menor concentración es la Suroeste. Además, cabe destacar que las mediciones no iniciaron a la par de los otros contaminantes, por eso la tendencia muestra valores a partir de 1995.

- ❖ En la zona Noroeste, tomando en cuenta el primer y último valor, la concentración de este contaminante aumentó un 8%.
- ❖ En la zona Noreste la concentración sufrió un aumento del 2%.
- ❖ En la zona Centro tomando el valor inicial y el final, la concentración se tuvo un aumento del 17.31%.
- ❖ En la zona Suroeste las PM_{10} presentaron un aumento del 3 %.
- ❖ En la zona Sureste el aumento de este contaminante en el periodo de estudio fue de 1.56%

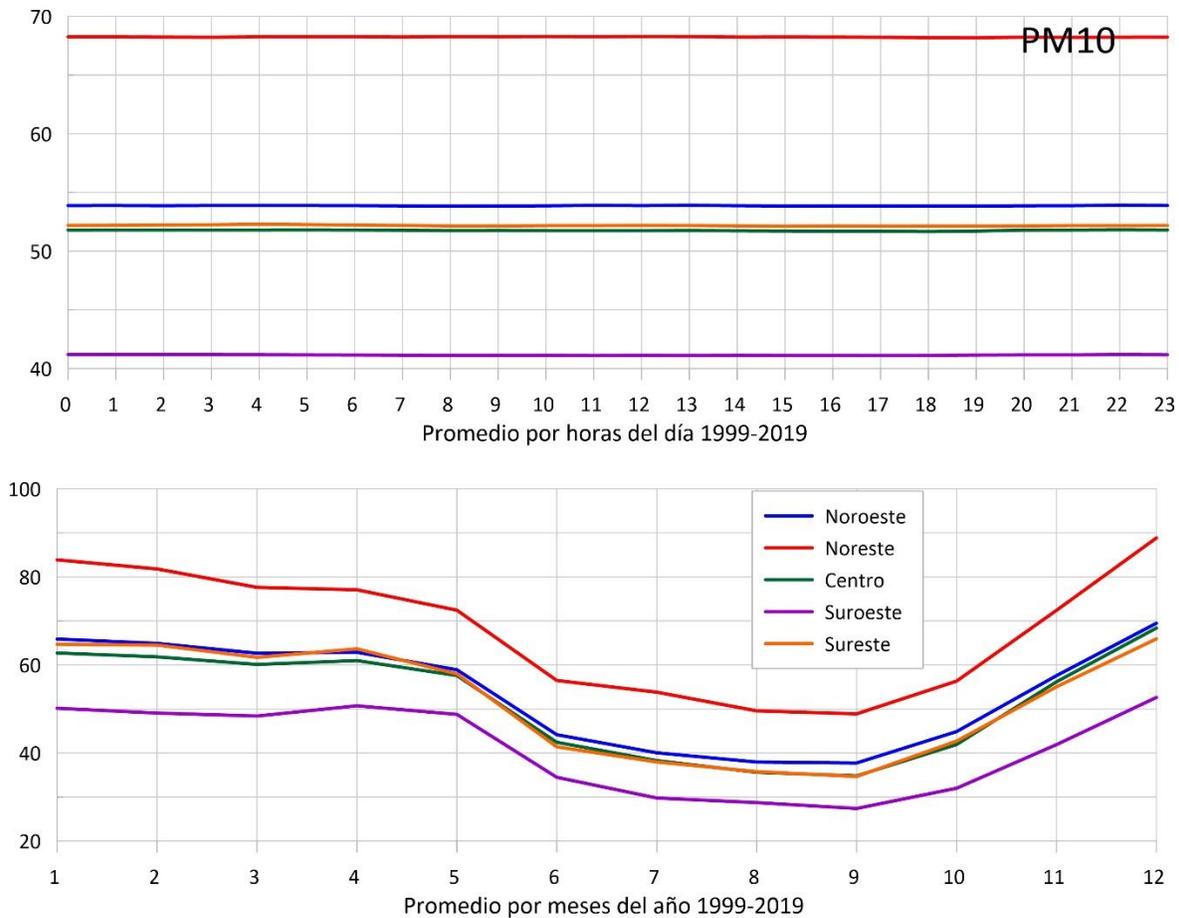


Figura 8-14 Comportamiento diario de los promedios por hora (panel superior) y comportamiento anual de los promedios mensuales (panel inferior) de la concentración en $[\mu g/m^3]$ del Material Particulado PM_{10} de 1995 a 2019 en las 5 zonas de la CDMX.

Al hacer el análisis de los promedios por hora (Fig. 8-14, parte superior), no se observa un cambio significativo en los valores de las concentraciones, estos prácticamente tienen un valor constante durante las 24 horas del día. Los valores varían entre $40 \mu g/m^3$ en la zona Suroeste, dónde se registra el valor mínimo, y $70 \mu g/m^3$ en la zona Noreste, dónde se registra el valor máximo; en el resto de las zonas los valores se encuentran entre 52 y $54 \mu g/m^3$.

En cuanto al comportamiento de los promedios mensuales (Fig. 8-14, parte inferior), se observa que en todas las zonas de la CDMX se presentan los valores más altos en la concentración de material particulado PM_{10} de noviembre a febrero, alcanzando los valores

máximos en diciembre, entre 90 y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. De junio a octubre se tienen los valores más bajos, siendo septiembre el mes con valores mínimos, entre 30 y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Al analizar los comportamientos diarios y anuales de las concentraciones de Material Particulado PM_{10} , se observa que al igual que en el comportamiento histórico, la zona Noreste es la que registra la mayor concentración, y la zona Suroeste la que registra la menor concentración.

8.5.2 Análisis espectral

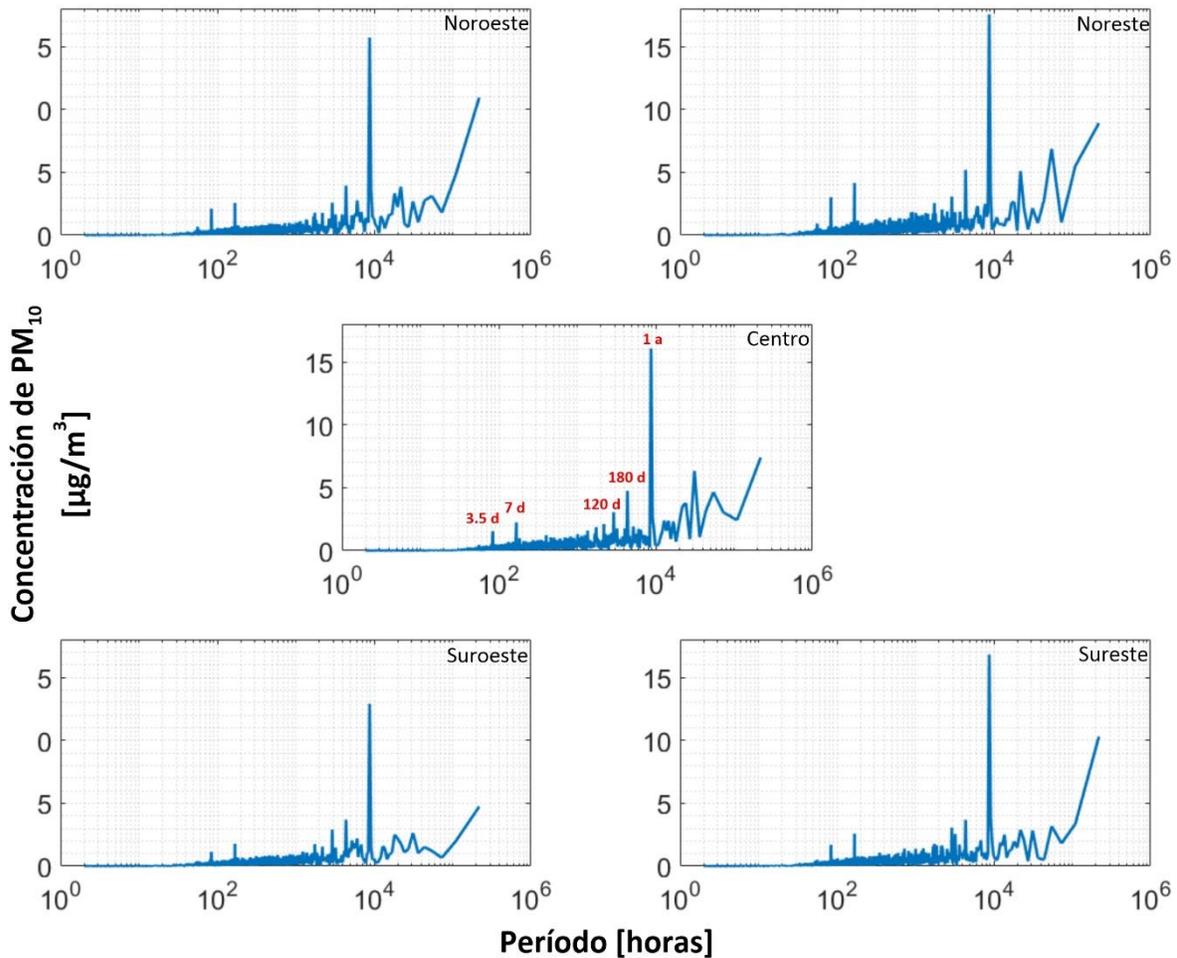


Figura 8-15 Espectro de frecuencia obtenido por medio de la FFT para la concentración en [$\mu g/m^3$] del Material Particulado PM_{10} de 1995 a 2019 en las 5 zonas de la CDMX (h = horas, d = días, a = años).

Al hacer el análisis espectral (Fig. 8-15) se observa que las series de concentraciones del Material Particulado PM_{10} tienen un comportamiento periódico. La componente anual es la más importante, aunque también se observa el aporte de las componentes de 120 y 180 días y en menor medida las componentes de media y una semana. En todas las zonas la componente más importante es la de 1 año y la mayor amplitud está presente en las zonas Noreste, Sureste, Noroeste y Centro, mientras que la menor amplitud está en la Suroeste.

8.6 Análisis Espacial y Temporal

Se presentan los resultados de la concentración de los contaminantes por zona de la CDMX (Tabla 8.1) y por componente principal de la serie periódica (Tabla 8.2).

Tabla 8-1 Zonas de la CDMX con mayor y menor concentración por contaminante.

Contaminante	Zona con mayor concentración de contaminante	Zona con menor concentración de contaminante
Ozono	Suroeste	Centro
Dióxido de Azufre	Noroeste	Suroeste, Sureste
Dióxido de Nitrógeno	Centro	Suroeste, Noreste
Monóxido de Carbono	Centro	Suroeste
PM ₁₀	Noreste	Suroeste

Tabla 8-2 Comportamiento de los promedios diarios de los contaminantes

Contaminante	Comportamiento diario
Ozono	Un máximo a las 15 horas
Dióxido de Azufre	Valor constante
Dióxido de Nitrógeno	Bimodal, máximos a las 11 y 21 horas
Monóxido de Carbono	Bimodal, máximo entre las 12, 13, 14 horas y 1 hora
PM ₁₀	Valor constante

Tabla 8-3 Comportamiento de los promedios anuales de los contaminantes

Contaminante	Concentración Máxima	Concentración mínima
Ozono	marzo a junio	agosto a diciembre
Dióxido de Azufre	octubre a marzo	noviembre a febrero
Dióxido de Nitrógeno	noviembre a febrero	junio a octubre
Monóxido de Carbono	noviembre a febrero	junio a octubre
PM ₁₀	noviembre a febrero	junio a octubre

Tabla 8-4 Componente principal del periodo por contaminante.

Contaminante	Componente principal del periodo
Ozono	24 horas
Dióxido de Azufre	1 año
Dióxido de Nitrógeno	12 horas y 1 año
Monóxido de Carbono	24 horas y 1 año
PM ₁₀	1 año

9. DISCUSIÓN

Las variables como la temperatura, la humedad y condiciones como la lluvia, el comportamiento de la capa de mezcla, las inversiones térmicas, los patrones de viento, la latitud, la radiación incidente y la orografía son determinantes en la formación y dispersión de contaminantes. Igualmente, los patrones de conducta de la sociedad, el ordenamiento territorial, las vías de comunicación y de transporte, los modos de producción y todo lo que conlleva el funcionamiento de una sociedad en una ciudad impactan en el ambiente y, en este caso, en la perturbación de las condiciones naturales de la atmósfera.

La contaminación es un problema multifactorial que no reconoce fronteras y que, al estar interrelacionada con tantos factores, una medida o programa no necesariamente se ve reflejado en la disminución de cierto contaminante, más bien se podría decir que conjuntamente han sido capaces de disminuir las concentraciones (al menos comparadas con los primeros años de estudio) de la mayoría de los contaminantes.

OZONO

Los resultados de las tendencias de la concentración del ozono mostraron que la mayor disminución de esta ocurrió entre 1998 y 1999, posteriormente la disminución del promedio de la concentración fue más lenta, lo cual es consistente con los resultados encontrados por Meraz et al. (2015) quien encontró que las tendencias alcanzaron un patrón estacionario no decreciente para el año 2007, en la estación Merced correspondiente a la zona Centro.

La notable disminución antes del año 2000 puede atribuirse a programas como: Hoy No Circula (HNC) y el programa de verificación vehicular para vehículos de pasajeros que comenzó en 1989, la introducción de catalizadores catalíticos de 2 vías en vehículos de pasajeros nuevos en 1991, la reducción de HC reactivos en gasolina en 1992, la introducción de convertidores catalíticos de 3 vías en vehículos de pasajeros nuevos en 1993, la regulación de emisiones industriales en 1994, que se introdujeron los sistemas de recuperación de vapores en centros de distribución de PEMEX en 1995 y un año después se exigió para

gasolineras de la ZMVM, el uso de la gasolina reformulada en 1997, el Programa de gas natural para vehículos pesados de pasajeros y de carga 1998, y el Programa de renovación de convertidores catalíticos en 1999 que buscaban disminuir las emisiones de fuentes móviles en general, no sólo del O₃. Se debe recordar que el Ozono es un contaminante secundario directamente relacionado con las emisiones de COV's, NO_x y HC reactivos emitidos por los vehículos, que es la fuente principal en el caso de los NO_x (aporta el 86.4% de las emisiones) y segunda fuente principal en el caso de los COV's (aporta el 23.2%) (SEDEMA, 2021a), aunque la primera en este último caso corresponde a las fuentes de área (66.7%).

El promedio por hora histórico muestra que la concentración de Ozono aumenta a partir de las 8 am, momento cercano al cual los NO_x, sobre todo el NO que conforma del 70 al 90% de los NO_x (SEDEMA, 2018a), decaen luego de participar en las reacciones fotoquímicas para la formación de Ozono, teniendo un punto máximo a las 15 horas como resultado del apogeo de la luz solar disponible. Los resultados obtenidos coinciden con los resultados del Informe Anual de Calidad del Aire 2018 (SEDEMA, 2020).

Los resultados encontrados en el análisis anual de los promedios mensuales históricos muestran que la mayor concentración de Ozono se presenta de marzo a junio (la temporada de Ozono se da de febrero a junio), meses en los que la CDMX se ve influenciada por la presencia de sistemas anticiclónicos que provocan estabilidad atmosférica, además la alta radiación solar en esta temporada provoca temperaturas altas. Estos resultados son consistentes con lo reportado en el Informe anual de Calidad del Aire correspondientes a 1992 y a 2018 (que son los años inicial y uno antes del final del periodo de estudio); contrariamente a lo que muestra Meraz et al. (2015), quienes para la zona Centro de la CDMX encontraron los valores máximos en la temporada de lluvias (verano-otoño), lo cual es contradictorio, ya que uno de los procesos de remoción del Ozono en la atmósfera es la lluvia, pues “limpia” la atmósfera, y es precisamente en esa temporada de lluvias en la que nuestros análisis muestran la menor concentración de Ozono.

Las altas concentraciones de Ozono en las zonas Sureste y Suroeste en la tarde son también el reflejo de la trayectoria que sigue el viento del Norte (predominante en la temporada seca) que suele ser débil en las mañanas y que va tomando fuerza al paso de las horas arrastrando hacia esas zonas los precursores (como el NO₂ cuya mayor concentración

se presenta en el Centro y Noreste pero es arrastrado) que reaccionan creando Ozono, proceso que se ve favorecido cuando la radiación solar es máxima, cuando ya fueron arrastrados los precursores hacia esas zonas, la velocidad de los vientos vuelve a disminuir (aproximadamente después de las 6 pm) volviéndose débiles, característica que, aunada a la altura de las elevaciones topográficas en la parte Sur (5,465 y 5230 msnm) provoca que la contaminación se quede estancada, en adición, los flujos de montaña catabáticos arrastran hacia abajo y acumulan gradualmente en la cuenca la contaminación que se emite y se genera en la tarde noche. Es decir, a los flujos predominantes no les da tiempo de dispersar de forma eficiente al Ozono fuera de la cuenca una vez que es producido, pues los flujos de montaña del periodo nocturno entran en contacto. El Ozono sigue rebasando la NOM que establece como límite 70 ppb, en un promedio de 8 horas.

Con los resultados del espectro de frecuencia se mostró que la periodicidad dominante es de 24 horas, para todas las zonas, y en menor magnitud las componentes estacionales y anuales. La componente correspondiente al ciclo diario, indica que la escala de tiempo de persistencia del contaminante esta mayormente influenciada por la actividad de la química atmosférica mediante las reacciones de fotólisis en ella y los patrones físicos de la atmósfera que permiten disiparlo día a día. La dinámica se ve afectada en menor medida por la temporada de Ozono, las estaciones, y los patrones de las actividades diferenciales de fin de semana, semanales o bien, días festivos. Esto es consistente con el resultado de Meraz et al (2015) para este contaminante (aunque únicamente lo desarrolló para la zona Centro de la Ciudad).

DIÓXIDO DE AZUFRE

El comportamiento histórico del promedio mensual de concentración del SO₂ descrito en los resultados muestra que prácticamente desde el 2006 no se rebasa la NOM que establece como límite 25 ppb como promedio anual en ninguna zona, aunque en el 2019 estuvo cerca del límite al registrar 23 ppb de concentración promedio en el Noroeste de la Ciudad.

El descenso de este contaminante, no es tan marcado, sin embargo, se puede ver que en el periodo 1992-1994 fue más notorio probablemente debido a diversas acciones encaminadas a reducir la concentración de la contaminación tales como: reubicación de la industria pesada fuera de la CDMX en 1990; la implementación de catalizadores catalíticos de 2 vías en vehículos de pasajeros nuevos, la reducción de los niveles de azufre de 2000 a 1000 ppm y el cierre de la refinería 18 de Marzo (ubicada en Azcapotzalco) en 1991. Aunque fueron medidas que contribuyeron a la mejora de la calidad del aire, lo cierto es que las fuentes regionales más importantes (la refinería y la termoeléctrica) siguen estando en la misma zona en la que se encontraba la refinería 18 de Marzo, la zona Noroeste, sólo que más alejadas, en la zona Tula en Hidalgo, donde se encuentra el corredor industrial Tula-Vito-Apasco, por lo que el viento sigue transportando este contaminante desde el Norte, lo cual confirma lo visto en los resultados, la zona Noroeste es la más contaminada, y la Suroeste y Sureste las menos contaminadas. Además, se observa un estancamiento en el descenso de la concentración del contaminante desde el 2007 en todas las zonas, tal como lo menciona Meraz et al (2015), aunado a esto, como se mencionó en la sección 3.2.2.2. las mayores fuentes de emisión son las fuentes de área, por lo que es de esperarse que la concentración aún siga siendo considerable y preocupante ya que los programas gubernamentales enfocados a reducir las emisiones de contaminantes (vistos en la sección 5.5.3) no estaban ni están enfocados a estas fuentes.

De acuerdo con los resultados obtenidos para el promedio horario no hay un cambio significativo entre los valores, sin embargo, hay un ligero aumento a partir de las 7 horas y la concentración es máxima a las 11 horas (a excepción de las zonas Sureste y Suroeste), momento en el que comienza a decrecer, lo cual es compatible con lo reportado en el Informe Anual de Calidad del Aire 2018 (SEDEMA, 2020). Esto se puede atribuir al horario de inicio de operación de la zona industrial y actividad vehicular, más la influencia del lento ascenso

de la capa de mezcla a esa hora, mientras que el descenso de la concentración a partir del mediodía probablemente se debe a la altura de la capa de mezcla en su apogeo y a que los vientos dominantes del Norte son más marcados conforme pasan las horas (después de las 8 am), además de los vientos de montaña que ascienden las primeras horas de la mañana. La alta concentración de SO_2 en la zona Noreste y Noroeste es el reflejo de la cercanía que tienen en esas zonas de la Ciudad de México las principales fuentes de emisión de tal contaminante (refinería y termoeléctrica de Tula y corredor Tula-Tepeji) y que seguramente emiten de forma continua y casi sin interrupción, aunado a ello, los vientos provenientes del Norte pueden no ser lo suficientemente fuertes para transportar hacia otras zonas la carga excesiva de emisiones que superan este poder de transporte, por lo que se concentran en las zonas más cercanas a Hidalgo (que queda aproximadamente a 1 hora). Además, como seguramente la jornada laboral y las emisiones terminan en la tarde, cuando la capa de mezcla decrece pues también decrece la radiación al igual que la turbulencia por un diferencial térmico se genera la capa residual nocturna haciendo que dentro de esta capa quede atrapada la contaminación que, bajo ciertas condiciones, puede volver a mezclarse con emisiones nuevas matutinas de una jornada laboral siguiente.

Los resultados encontrados en el análisis anual de los promedios mensuales históricos revelan que la máxima concentración, que se da de octubre a marzo, se puede deber a que en la temporada invernal el aire frío que asciende (cuando el suelo ha perdido calor por la poca radiación) se queda atrapado por una masa de aire caliente, pues ocurre una inversión térmica que inmoviliza la dispersión de contaminantes. Mientras que la concentración mínima que ocurre de abril a septiembre (con el mínimo en septiembre), que coincide con lo presentado en el Informe Anual de Calidad del Aire 2018 (SEDEMA, 2020), puede ser debido a la “limpieza” de la atmósfera provocada por la época de lluvias.

El espectro de frecuencia exhibe una periodicidad anual influenciada en su mayoría por las estaciones, con los marcados rasgos meteorológicos de cada una y la influencia de la magnitud de vientos dominantes y actividades industriales de la región. Los resultados de la ciclicidad son consistentes con el estudio de la zona Centro de Meraz et al (2015) y difieren de las encontradas en 1980 por Klaus y Jáuregui quienes, por medio de un análisis armónico especial, encontraron una periodicidad diurna muy marcada de 24 horas y doble en ocasiones,

es decir, con dos máximos a diferentes horas, que no coincide con el pequeño pico de concentración matutino encontrado en nuestros resultados.

DIÓXIDO DE NITRÓGENO

Con respecto al comportamiento histórico del NO₂ no se tiene un patrón marcado de descenso en ninguna zona, aunque si es notable que las concentraciones eran un poco mayores antes del 2001 (y en el Noreste en ese año hubo un aumento significativo) a diferencia de años posteriores, nuestros resultados coinciden con los de Meraz et al (2015) los cuales muestran un estancamiento en la disminución de la concentración desde el 2007.

Debido a la falta de un patrón evidente en el comportamiento histórico, no es tan sencillo relacionar el comportamiento de concentración año por año con las medidas aplicadas por el gobierno y, por lo tanto, tratar de ver la eficiencia de éstas. No obstante, los diferentes programas antes del 2000 tenían previsto reducir las emisiones generadas, principalmente por fuentes móviles, lo cual aplica para los NO_x vinculados a esta sección. El principal motivo por el cuál la concentración de este contaminante no ha disminuido a pesar de los programas aplicados por el gobierno podría ser el aumento constante del parque vehicular.

La zona Centro es la más contaminada, esto coincide con lo reportado en el Informe Anual de Calidad del Aire 2018 (SEDEMA, 2020). La razón más lógica es que el tránsito vehicular en el Centro del Norte hacia el Centro es mayor, pues gran parte de los viajes provienen de los municipios conurbados del Estado de México y los procesos de combustión en la zona podrían ser los principales factores para tal comportamiento, mientras que la zona de menor concentración es la Suroeste y Noreste, las cuales coinciden con las mayores zonas de conservación y dónde se localiza la menor densidad de fuentes puntuales. El comportamiento bimodal del NO₂ refleja bien el patrón de movilidad de la Ciudad pues corresponde a las horas de mayor tránsito, la zona Centro es la más contaminada lo cual puede atribuirse, además de lo que ya se dijo, al desarrollo de zonas de convergencia en las tardes, que propicia el estancamiento de la contaminación que no es eficientemente dispersada por medio del viento predominante cuya dirección es del Norte, el pico de la tarde noche se extiende hasta la madrugada probablemente porque las actividades de la zona Centro, al ser una zona de recreación y comercio, cesan muy tarde lo cual como se mencionó anteriormente, provoca que la contaminación emitida en las tardes se quede estancada en la

capa residual nocturna, sin contar que los vientos catabáticos a esas horas ya juegan un papel importante.

Como la fotólisis de este contaminante produce O_3 , cuando la concentración de O_3 es máxima, es decir, aproximadamente de 1-4 pm los niveles de NO_2 son mínimos, lo mismo ocurre en la madrugada, cuando la concentración de ozono comienza a aumentar entre la 1 y 5 am la del NO_2 es baja.

El promedio histórico por hora también es muy parecido al del informe, en él se indica que a partir del máximo de concentración de NO (8 am), relacionado con el aumento del tránsito vehicular y la capa límite reconstruida (SEDEMA, 2020), comienza a oxidarse a NO_2 por lo que este contaminante presenta un aumento una hora después del punto máximo del NO (9 am), sin embargo, nuestros resultados muestran que es desde las 5 am que inicia el aumento en la concentración y tiene su máximo a las 11 am. En la gráfica del informe también se ve el aumento desde las 5 am, por lo tanto, lo dicho anteriormente respecto al aumento de NO_2 una hora después del pico máximo de NO es una descripción teórica y en cierto modo perfeccionista de ver que el tiempo de oxidación encaja a la perfección entre los dos contaminantes. Con relación al pico matutino de las 11 am, este difiere del presentado en el Informe pues éste está atrasado en una hora.

En los resultados obtenidos se observa un segundo máximo de menor magnitud, entre las 20 y 22 horas, debido a la fotoquímica generada en horas con luz y la reconstrucción de la capa límite que genera estabilidad a esas horas, esto también coincide con lo reportado en SEDEMA (2020).

Por otra parte, los resultados encontrados en el análisis anual de los promedios mensuales históricos coinciden con el Informe Anual de Calidad del Aire 2018 (SEDEMA, 2020), pues las concentraciones son máximas en la temporada fría, por el papel que juega la capa de mezcla e inversiones térmicas en esa época, y mínimas en temporada de lluvias que puede deberse a la remoción por disolución en el agua. La concentración del NO_2 no rebasa el valor límite permisible de la NOM que indica no exceder en máximo 1 hora los 210 ppb de concentración.

Finalmente, los resultados del espectro de frecuencias muestran una periodicidad dominante de los ciclos de 12 horas, 24 horas, medio año y un año, en menor amplitud también se observa un ciclo de media y una semana. Lo cual indica que la contaminación por Dióxido de Nitrógeno está asociada a los patrones del tráfico vehicular (horas) y del trabajo de las personas (media y una semana), así como con la época invernal (anual) y los ciclos estacionales.

MONÓXIDO DE CARBONO

En cuanto al CO se encontró un notable descenso en la concentración promedio desde el primer año de estudio hasta el 2019, siendo mayor esta disminución en los primeros años, principalmente en 1993, es probable que esto esté ligado a las acciones de mejora de calidad del aire como reducción de HC reactivos en gasolina en 1992 e introducción de convertidores catalíticos de 3 vías en vehículos de pasajeros nuevos en 1993, además, considerando que las medidas no actúan de manera inmediata en la mejora de calidad del aire podría incluir también el HNC en 1989 y la introducción de catalizadores catalíticos de 2 vías en vehículos de pasajeros nuevos en 1991 y, de manera general o posterior a estos años se puede agregar que el avance en la tecnología utilizada en vehículos nuevos para reducir emisiones ya que de acuerdo con SEDEMA (2021a), de las emisiones totales del CO el 96.8% lo aportan las fuentes móviles mientras que el 2.8% proviene de fuentes de área en donde se llevan a cabo procesos de combustión. El CO, no rebasa la NOM que indica 11 ppm en un promedio de 8 horas.

El promedio histórico por hora presenta un ligero aumento de concentración desde las 6 horas, teniendo el máximo a las 13 horas en la mayor parte del territorio, a las 2 pm en dos zonas y a las 12 en una zona. Así mismo, se observa un segundo aumento desde las 20 horas. Este comportamiento se puede relacionar con el aumento matutino y vespertino del tránsito vehicular (como ya se mencionó las fuentes móviles son las principales emisoras) que marcan los traslados para iniciar y regresar de las actividades cotidianas, además del aporte nocturno de fuentes móviles, este aporte también puede relacionarse con las actividades nocturnas que no están reguladas, por ejemplo, es cuando se suele quemar basura de forma clandestina, en lugares donde hace mucho frío en las noches también se recurre a la quema de madera, se prenden chimeneas y hornos, también debe considerarse las emisiones provenientes de casas al prender la estufa, lo que resulta en emisiones que no se distribuyen de forma eficiente en la atmósfera pues los vientos son débiles, quedándose en la capa remanente hasta las primeras horas del día siguiente. Como los niveles de CO más altos ocurren en la zona Centro, el desarrollo de zonas de convergencia facilita el estancamiento de este contaminante, además como se ha venido mencionando, cuando los vientos catabáticos son los que dominan, es decir, en la noche, tampoco permiten que la

contaminación se disperse fuera de la cuenca y seguramente los vientos del Norte son débiles como para dispersar el volumen emitido aun cuando en la tarde van tomando fuerza.

Por otra parte, los resultados encontrados en el análisis de los promedios mensuales históricos muestran que hay un claro patrón de concentraciones mayores en temporada invernal pues, al igual que ocurre con otros contaminantes, la influencia de los vientos que dominan en cada época, la frecuencia de inversiones térmicas, la menor altura de la capa de mezcla y la común estabilidad de la atmósfera provocan que los contaminantes prevalezcan mucho más y, como en los demás casos, la temporada de lluvias marca las concentraciones mínimas que pueden asociarse a su remoción por disolución en la superficie del agua.

Finalmente, el espectro de frecuencia de este contaminante exhibe una periodicidad dominante de 12 horas, 24 horas y 1 año, con menor amplitud aparecen las componentes asociadas a media y una semana, confirmando que esta contaminación está asociada con las actividades laborales diarias y la época invernal.

MATERIAL PARTICULADO PM₁₀

Las PM₁₀ han aumentado en su concentración desde finales del 2014 y en general nunca se vio un drástico descenso desde el inicio del periodo de estudio, aunque hubo una ligera disminución entre el 2000-2002 y 2006-2008. El comportamiento de las PM₁₀ es muy complejo debido a las diversas fuentes que las emiten, su composición y tamaño. Las medidas implementadas por el Gobierno reflejan seguir siendo ineficientes para reducir su concentración. Al intentar relacionar el comportamiento de los contaminantes con los programas gubernamentales se podría decir que son precisamente los ya mencionados para otros contaminantes antes del 2000 los que contribuyeron al tan ligero descenso después del año 2000 pues como ya se vio están enfocados a las emisiones vehiculares las cuales pertenecen a las fuentes móviles, que son la segunda fuente más importante de emisiones de PM₁₀ (39.8%) en la CDMX. Los programas después del 2000 que pudieran asociarse a la mejora de la calidad del aire muestran un aporte no tan significativo en la reducción de este contaminante porque la concentración se mantuvo fluctuando casi en el mismo intervalo del 2000 al 2014 (en cuyos últimos meses aumentó drásticamente), de allí que la implementación de programas o acciones que buscan una reducción de emisiones de fuentes móviles no debería de ser la única vía para combatir este problema sino también concentrar esfuerzos para reducir las emisiones de fuentes de área, que son de hecho la principal fuente (46.4%) y son mucho más complejas de regular. Por todo esto, es evidente que el valor límite permitido según la NOM, que establece como máximo 40 µg/m³ de promedio anual, sigue incumpliendo gravemente.

En cuanto al promedio histórico por hora los resultados son diferentes de los presentados en el Informe Anual de Calidad del Aire 2018 (SEDEMA, 2020), pues en las gráficas del informe hay un marcado aumento de concentración desde las 4 horas que se intensifica paulatinamente durante toda la mañana, tiene un máximo a las 10 am y comienza a bajar poco a poco, teniendo un mínimo a las 14, momento en el cual comienza un leve ascenso que genera un pico entre las 15 y 19 horas y posteriormente vuelve a bajar suavemente; en el informe lo relacionan con el comportamiento del tránsito vehicular. En los resultados de este estudio, se tienen valores prácticamente constantes, lo que nos indica que no hay procesos de corto periodo de tiempo que afecten la concentración de este

contaminante en la atmósfera. Es decir, el comportamiento tan estable de las PM_{10} a lo largo del día en los resultados muestra que variables como el viento o la química atmosférica no contribuyeron a su distribución a lo largo del día, sino que constantemente hay un volumen de emisión, aunque las emisiones de PM_{10} se relacionan más con procesos mecánicos y emisiones primarias y las emisiones de $PM_{2.5}$ con procesos secundarios, el mayor aporte de las PM_{10} proviene de fuentes de área (46.4%), le siguen las fuentes móviles (39.85%), estos porcentajes son muy parecidos, es decir, fuentes móviles que las emiten (se esperaría que en horas pico) y fuentes de área variadas emitiendo durante todo el día y además no reguladas en su mayoría, provocan que el comportamiento casi constante en estos resultados no coincida con los resultados del Informe Anual de Calidad del aire 2018 que siguen un patrón comparable con el tráfico vehicular, pues esta no es la principal fuente de emisión. Una vez más queda de manifiesto que concentrar esfuerzos para reducir y regular las fuentes de área debería ser una actividad urgente, sin ello las emisiones de PM_{10} no disminuirán.

Cabe señalar que la zona Noreste y Noroeste son las que presentan los valores más altos de concentración y coincide con fuentes importantes, sobre todo de la ZMVM, que pueden emitir compuestos que favorecen la aparición de las PM_{10} , por ejemplo: la carretera México-Pachuca, la cercanía de la zona industrial de Ecatepec, la termoeléctrica de Tula que emite gran parte del SO_2 , que junto con la humedad forma ácidos en forma de aerosoles produciendo una parte importante de $PM_{2.5}$, las cuales constituyen aproximadamente el 52% de las PM_{10} (SEDEMA, 2018a), sin contar que los comercios no regulados y las actividades diarias del hogar en conjunto son las principales fuentes. El viento predominante del Norte debería tener la capacidad de transportar mucho más lejos estas emisiones, no obstante, puede que los flujos sean débiles, aunado a los flujos catabáticos de la cuenca y condiciones estables en la atmósfera que no permiten que este contaminante se disperse.

Por otra parte, los resultados encontrados en el análisis anual de los promedios mensuales históricos de este contaminante reflejan algo parecido a los demás contaminantes, los valores son mayores en la temporada fría, sobre todo en noviembre y diciembre a consecuencia de las condiciones atmosféricas predominantes en tales meses (mencionadas

anteriormente), mientras que los menores ocurren en temporada de lluvias pues uno de los principales procesos de remoción es precisamente la lluvia.

Los resultados del espectro de frecuencias muestran ciclos de un año, por lo que su presencia en la atmosfera representa una influencia poco eficiente de la dispersión por medio de vientos o procesos fotoquímicos de corta duración, consistente con el hecho de que el comportamiento de concentración diario se vea casi constante, en cambio, está mayormente influenciada por ciclos ambientales de mayor escala de tiempo como la temporada invernal.

Para terminar, se habló mayormente de los vientos con componente del Norte, que son los más recurrentes, sin embargo, los vientos a nivel sinóptico también pueden tener componente del Sur (que se asocian a buena calidad del aire en la cuenca) o bien de otras direcciones, pero constituyen una porción mucho más pequeña de recurrencia, por ello, de forma general, el análisis se centró en ellos y los locales y cómo impactan en la calidad del aire de la Ciudad.

Como se vio, los vientos juegan un papel muy importante en la dispersión y comportamiento de la contaminación, en este sentido, si los vientos predominantes en la cuenca son los sinópticos durante el día y en la temporada seca tienen componente del Norte la mayor parte del año éstos deben de ser lo suficientemente fuertes para poder dispersar la contaminación, sin embargo, no es la única variable que impacta en el comportamiento de la contaminación por lo que aun teniendo los perfiles del viento a escala sinóptica a lo largo del año el análisis se vería limitado, faltarían aquellos de escala local determinados por la orografía, además, la altura de la capa de mezcla y la capa límite también nos puede decir mucho de cómo se está dispersando verticalmente un contaminante, no obstante para poder hacer un análisis más detallado que implique estos dos conceptos se tendría que tener los perfiles de la temperatura atmosférica de todas las zonas para realizar la estimación del espesor de estas capas y hacer una comparación con la concentración de los contaminantes, sin olvidar que las condiciones de inestabilidad o estabilidad atmosférica y el desarrollo de precipitación también son de mucha ayuda en el entendimiento más detallado.

10. CONCLUSIONES

Las tendencias de los promedios anuales y horarios históricos muestran que, de los cinco contaminantes estudiados, el O_3 y PM_{10} rebasan los límites permisibles aplicados por las Normas Oficiales Mexicanas, a pesar de todos los programas que ha desarrollado el gobierno para tratar de disminuir su concentración. Esta situación es alarmante sobre todo para las PM_{10} ya que en los últimos 5 años la concentración ha ido en aumento hasta alcanzar los valores de los primeros años de estudio, cuando la contaminación era mayor. Todo esto tomando en cuenta las NOM's, si nos basamos en las directrices de la OMS y los estándares de la U.S EPA la situación se torna aún peor ya que estas son más estrictas. Lo anterior nos lleva a sugerir que se deben tomar acciones drásticas y contundentes para frenar el aumento en la concentración de estos contaminantes. Se sugiere que estas acciones no se den solo para las fuentes móviles, sino que esta vez vengan más relacionadas con las fuentes de área y que tomen en cuenta no solo la producción de los contaminantes sino el transporte de estos.

Por otro lado, las concentraciones de CO , SO_2 y NO_2 , a pesar de que ya no rebasan las concentraciones límite permisibles, establecidas por las Normas Oficiales Mexicanas desde hace más de una década, los últimos dos contaminantes si suelen rebasar (en algunas zonas y horarios) el estándar de la U.S. EPA y los valores guía de la OMS dictados para cada uno de ellos. Esto ocurre, como ya se indicó, debido a que estas son más estrictas. Por lo tanto, a pesar de que se ha reducido significativamente la concentración de estos contaminantes se debe buscar reducirlos aún más hasta aprobar los estándares internacionales. Es importante resaltar que uno de los componentes principales de la materia particulada PM_{10} son los sulfatos, derivados del SO_2 , por lo que, aunque su concentración ha ido a la baja y no rebasa los límites permisibles aporta un gran porcentaje de compuestos que conforman a uno de los principales problemas de contaminación que, además, va a la alta.

Las tendencias de los promedios históricos, por hora, de los contaminantes presentaron distintos comportamientos, el O_3 presenta un comportamiento como si fuera una distribución normal, es decir, su aumento está directamente relacionado con las reacciones fotoquímicas que se ven favorecidas cuando la radiación solar se encuentra en su punto más alto. También se debe tomar en cuenta que estas reacciones transforman otros contaminantes

como los NO_x y COV's en O₃, por lo que el Ozono se puede ver como un indicador general de la contaminación, ya que, aunque en determinadas horas del día baje la concentración de NO_x y COV's, si el O₃ aumenta en realidad la contaminación persiste.

El SO₂ y PM₁₀ en cuanto a las tendencias de los promedios históricos por hora, presentan un comportamiento constante a lo largo del día, lo que significa que los procesos diurnos y semidiurnos no juegan realmente un papel importante en la concentración de estos contaminantes. Los contaminantes NO₂ y CO presentan comportamiento bimodal, lo cual está asociado a procesos semidiurnos como el día y la noche, y las horas de entrada y salida de las jornadas laborales, principalmente. Esto nos permite inferir que la creación de nuevas rutas y programas en el transporte público, que impliquen además renovar la flota debería ser una estrategia urgente para implementar.

Las tendencias de los promedios mensuales históricos exhibieron un patrón bimodal similar para la concentración del SO₂, NO₂, CO y PM₁₀, el cual está relacionado directamente con la temporada fría y la temporada húmeda, con niveles máximos en los últimos meses del año y niveles mínimos en los meses de lluvia, esto propicia además de otros fenómenos meteorológicos, la "limpieza" de la atmósfera. Por otra parte, el O₃ presenta los valores máximos de marzo a junio (una distribución normal), cuando las reacciones fotoquímicas se ven favorecidas, y los valores mínimos, al igual que los otros contaminantes, en los meses de lluvia. Es decir, el comportamiento de todos los contaminantes está modulado por los patrones de lluvia, vientos, temperatura, radiación solar y estacionales propios de la zona. La producción de O₃ es mayor en los meses de primavera, cuando la radiación solar es mayor, debido a que su producción aumenta en presencia de luz. La producción del resto de los contaminantes se da principalmente en la temporada de invierno donde se producen más debido al aumento en la quema de combustibles fósiles, aumento de fogatas, actividades recreativas con implicación de fuegos artificiales, entre otras y además quedan atrapados en la capa límite debido a la temporada de inversiones térmicas (noviembre-febrero); mientras que la limpieza o remoción de estos contaminantes se da mayormente en verano con la llegada de las lluvias pues implica su disolución en agua y depositación en el suelo, vegetación y estructuras.

Los resultados del espectro de frecuencias muestran que la periodicidad dominante del SO₂ y PM₁₀ es de 1 año, lo que significa que está directamente relacionado con fenómenos estacionales (principalmente la temporada invernal). Esto significa que los programas de acción rápida, como el doble hoy no circula, no son tan útiles en estos casos.

La periodicidad del NO₂ y CO se ve afectada principalmente por componentes de 12 horas, 24 horas y 1 año, y en menor medida, media y una semana (procesos diarios, y actividades laborales). El O₃ se ve afectado principalmente por las componentes de 12 y 24 horas (procesos diarios, y actividades laborales), y en menor medida medio y un año (procesos estacionales). En estos casos los programas de acción rápida (Hoy no circula) son muy útiles para disminuir el nivel de contaminación debido a que disminuyen los contaminantes en las siguientes 24 horas.

Aunque los programas y medidas adoptadas por el Gobierno han logrado disminuir los niveles de concentración respecto a la década de los años noventa (exceptuando las PM₁₀ que sólo disminuyeron en un periodo relativamente corto), siguen siendo insuficientes para regular los niveles emitidos en la CDMX que, alguna vez fue la más contaminada del mundo.

Las zonas con mayor concentración de cada contaminante son: O₃-Suroeste, SO₂-Noroeste, NO₂ y CO-Centro, PM₁₀-Noreste. Las zonas menos contaminadas por cada contaminante son: O₃-Centro, SO₂-Suroeste y Sureste, NO₂-Suroeste y Noreste, CO-Suroeste, PM₁₀-Suroeste, por lo cual, la zona Suroeste es la menos contaminada en general, sin embargo, es la que presenta mayor concentración de Ozono.

Como la exposición a SO₂ provoca tos, irritación en la nariz y garganta, broncoconstricción y disnea, probablemente son las afecciones que mayormente presenta la población del Noroeste de la Ciudad (relacionadas con la contaminación), además como ya se dijo contribuyen a la formación de la materia particulada, la cual entra hasta los alveolos, ya que es imposible para nuestro organismo retenerla en el sistema respiratorio superior, lo que conlleva a mayores afecciones respiratorias.

En la zona Centro de la CDMX, debido a que es la zona que presenta mayor concentración de NO₂, la población que ahí radica es mucho más propensa a vivir con irritación en nariz y garganta, broncoconstricción y disnea, además, derivado de la exposición

a este contaminante pueden sufrir infecciones respiratorias de forma regular y déficit del crecimiento de la función pulmonar en los niños. En esta misma zona la población también está altamente expuesta a las afecciones provocadas por CO, entre las más graves están que inhibe la capacidad de transporte de oxígeno y que más de la mitad de todas las intoxicaciones fatales reportadas en todo el mundo son por este contaminante. Es muy probable que la población que reside en esta zona presente mareos constantemente.

En el Noreste, la zona que presenta mayor concentración de PM₁₀, las personas pueden presentar reducción de la función pulmonar, citotoxicidad, inflamación y mutagénesis, así como manifestaciones extrapulmonares, además aumenta la mortalidad.

Aunque la zona Suroeste es la menos contaminada en general, su población está altamente expuesta a las concentraciones de O₃ y, por ende, a sus efectos, que incluyen: daño celular en el tracto respiratorio, reducción en la función pulmonar, déficits en el crecimiento pulmonar de los niños, enfermedad obstructiva pulmonar crónica (EPOC), infarto agudo de miocardio, accidentes vasculares encefálicos, capacidad vital forzada reducida, volumen respiratorio forzado y aumento de la susceptibilidad a las infecciones respiratorias, además de la muerte, lo cual incluso se podría relacionar con lo ocurrido por la pandemia de COVID-19 pues ha sido la delegación Tlalpan (perteneciente al Suroeste) una de las más afectadas por estas afecciones agravadas derivado del virus.

Con todo esto se puede inferir que las zonas con mayor riesgo para las personas serían la Suroeste, Noreste y Centro de la CDMX considerando únicamente que ahí se concentran los contaminantes que siguen rebasando las NOM, sin embargo, en realidad todas las zonas de la ciudad presentan niveles de contaminación que ponen en peligro la salud de sus habitantes.

Se encontró que la reducción de concentración del O₃ fue del 78% en el Noroeste, 74% en el Noreste, 80% en el Centro, 66% en el Suroeste y 66% en el Sureste. Para el SO₂ 45% en el Noroeste, 57% en el Noreste, 65% en el Centro, 74% en el Suroeste y 79% en el Sureste. Para el NO₂ 6% en el Noroeste, 20% en el Noreste, 32.2 en el Centro, 31% en el Suroeste y 24% en el Sureste. Referente al CO disminuyó 88% en el Noroeste, 73% en el Noreste, 86% en el Centro, 84% en el Suroeste y 88% en el Sureste. Contrario a los casos

anteriores, para las PM_{10} se observó un aumento del 8% en el Noroeste, 2% en el Noreste, 17% en el Centro, 3% en el Suroeste y 1.5% en el Sureste.

Si bien este trabajo no representa toda la compleja dinámica atmosférica y los procesos de producción, evolución y eliminación de la contaminación en el aire, es una recopilación sustancial de su comportamiento, lo cual se refleja en las concentraciones de los principales contaminantes en todas las zonas de la CDMX que vale la pena tomar en cuenta.

Este estudio además de mostrar la distribución y concentración de contaminantes en la CDMX podría relacionarse con bases de datos de estudios epidemiológicos de enfermedades respiratorias en niños, jóvenes y adultos mayores hechos de 1990 a la fecha para relacionar la cantidad de afecciones respiratorias a través del tiempo y relacionarlas con las zonas con mayor concentración de contaminantes. Lo anterior para buscar patrones de ocurrencia de enfermedades específicas relacionadas con un determinado contaminante, o con varios de ellos, para los distintos sectores de la población. Todo esto serviría para entender realmente cuales son las consecuencias de los altos niveles de contaminación en cada región de la CDMX.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, M., Reyes, H. y Reyes, O. (2019). *La Historia Ambiental en México: Estudios de Caso*. Primera Edición. México. UASLP. ISBN: 978-607-535-103-2. Consultado el 24/02/2022 <http://sociales.uaslp.mx/Documents/Publicaciones/Libros/LaHistAmbMexico.pdf>
- Alfaro-Moreno, E., Nawrot, T., Nemmar, A. y Nemery, B. (2007). Particulate matter in the environment: pulmonary and cardiovascular effects. *Current opinion in pulmonary medicine*, 13(2), 98-106. <https://doi.org/10.1097/mcp.0b013e328013f47e>
- Artés, A., Pérez, F., Cid, J., López, R., Mosquera, C., y Pérez, F. (2012). *Comunicaciones digitales*. Pearson Educación/Prentice Hall. ISBN 8483223481.
- ATSDR: Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (2012). *Resúmenes de Salud Pública - Monóxido de Carbono*. Consultado el 24/02/2022 https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs201.pdf
- Badman, D. y Jaffé, E. (1996). Blood and air pollution; state of knowledge and research needs. *Otolaryngology--Head and Neck Surgery*, 114(2), 205-20. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1016/S0194-59989670166-3>
- Ballinas, M. y Barradas, V. (2016). The Urban Tree as a Tool to Mitigate the Urban Heat Island in Mexico City: A Simple Phenomenological Model. *Journal of Environment Quality*, 45(1), 157. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.01.0056>
- Bell, M., Dominici, F. y Samet, J. (2005). A meta-analysis of time-series studies of ozone and mortality with comparison to the national morbidity, mortality, and air pollution study. *Epidemiology*, 16(4), 436-45. <https://doi.org/10.1097/01.ede.0000165817.40152.85>
- Blackman R. y Tukey, J. (1958) The measurement of power spectra. Dover, New York
- Campisano C., et al (2017), The Hominin Sites and Paleolakes Drilling Project: high-resolution paleoclimate records from the East African rift system and their implications for understanding the environmental context of hominin evolution. *PaleoAnthropology* 2017:1–43. <https://doi.org/10.1130/abs/2017am-295426>
- Bolaños, P. y Chacón C. (2017). Intoxicación por monóxido de carbono. *Medicina Legal de Costa Rica*, 34(1), 137-146. Consultado el 24/02/2022 http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1409-00152017000100137&lng=en&tlng=es
- Bravo-Álvarez, H., Sosa-Echeverria, R., Sánchez-Álvarez, P. y Jaimes-Palomera, M. (2002). La calidad del aire en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y recomendaciones para mejorarla considerando conceptos básicos de ingeniería ambiental. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 3(4), 185-193. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2002.03n4.018>
- Burgos, A. (2021). *Caracterización de la Capa limite atmosférica sobre la Ciudad de México*. Tesis de Doctorado, UNAM. <http://132.248.9.195/ptd2021/febrero/0809631/Index.html>

- CAME: Comisión Ambiental de la Megalopolis (2011). *Programa para mejorar la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020 (PROAIRE 2011-2020)*. Consultado el 24/02/2022 https://sma.edomex.gob.mx/mejorar_calidad_aire_zona_metropolitanavallemexico#:~:text=El%20nuevo%20Programa%20para%20Mejorar,los%20procesos%20de%20generaci%C3%B3n%20de
- CDHDF: Comisión de Derechos Humanos del Distrito Federal (2017). *Sobre calidad del aire y derechos humanos*. Primera Edición. Ciudad de México. Consultado el 24/02/2022 <https://cdhcm.org.mx/wp-content/uploads/2017/11/Propuesta-General-1-2016-Sobre-calidad-del-aire-y-derechos-humanos.pdf>
- CEOHAATS (1996). Health effects of outdoor air pollution. Committee of the Environmental and Occupational Health Assembly of the American Thoracic Society (CEOHAATS). *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 153(1), 3–50. <https://doi.org/10.1164/ajrccm.153.1.8542133>
- CESOP: Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública (2006). *Medio ambiente*. Cámara de Diputados, LXV Legislatura. Consultado el 24/02/2022 www.diputados.gob.mx/cesop
- Chapra, S., Canale, R., Ruiz, R. S. G., Mercado, V. H. I., Díaz, E. M. y Benites, G. E. (2011). *Métodos numéricos para ingenieros* (Vol. 5). McGraw-Hill.
- Checa-Artasu, M. (2016). Las áreas verdes en la Ciudad de México. Las diversas escalas de una geografía urbana. *Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales*. 21(1.159) Consultado el 24/02/2022 <https://revistes.ub.edu/index.php/b3w/article/view/26339/27794>
- Contreras, A., García S. e Icaza, B. (2013). *Calidad del aire: una práctica de vida*. Ciudad de México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Consultado el 24/02/2022 <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD001593.pdf>
- Cui, Y. y De Foy, B. (2012). Seasonal variations of the urban heat island at the surface and the near-surface and reductions due to urban vegetation in Mexico City. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(5), 855-868. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0104.1>
- De Arruda G., Guerrero-Rascado, J., Bravo-Aranda, J., Benavent-Oltra, J., Ortiz-Amezcuca, P., Róman, R., Bedoya-Velásquez, A., Landulfo, E. y Alados-Arboledas, L. (2018). Study of the planetary boundary layer by microwave radiometer, elastic lidar and Doppler lidar estimations in 3 Southern Iberian Peninsula. *Atmospheric Research*. 213, 185-195. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.06.007>
- DOF: Diario Oficial de la Federación. (1971). *Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental*. Consultado el 24/02/2022 <http://dof.gob.mx/index.php?year=1971&month=03&day=23>
- DOF: Diario Oficial de la Federación. (2019). *NORMA Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019, Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de*

- Calidad del Aire y Riesgos a la Salud*. Consultado el 24/02/2022
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5579387&fecha=20/11/2019
- EC: European Commission (2004). *Second Position Paper on Particulate Matter*. CAFE Working Group on Particulate Matter. Consultado el 24/02/2022
https://ec.europa.eu/environment/archives/cape/pdf/working_groups/2nd_position_paper_pm.pdf
- FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). *Ciudad de México. Agricultura urbana y periurbana en América Latina y el Caribe*. Consultado el 24/02/2022
https://www.fao.org/ag/agp/greenercities/es/CMVALC/ciudad_de_mexico.html
- Ferrer, J. y Escalante, R. (2009). Contaminación atmosférica y efectos sobre la salud en la Zona Metropolitana del Valle de México. *Economía informa*. (360), 22-39. Consultado el 24/02/2022
<http://www.economia.unam.mx/publicaciones/econinforma/pdfs/360/03escalanteyjimy.pdf>
- Fleta, J.; Fons, C.; Arnauda, P.; Ferrer, A. y Olivares, J. (2005). Intoxicación por monóxido de carbono. *Anales de Pediatría*. Barcelona, España. 62(6): 587-90.
<https://www.analesdepediatria.org/es-intoxicacion-por-monoxido-carbono-articulo-13075553>
- Foy, B., Varela, J., Molina, L. y Molina, M. (2006). Rapid ventilation of the Mexico City basin and regional fate of the urban plume. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 2321–2335.
<https://doi.org/10.5194/acp-6-2321-2006>
- GDF: Gobierno del Distrito Federal (2012). *Atlas geográfico del suelo de conservación del Distrito Federal*. Secretaría del Medio Ambiente, Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del Distrito Federal, México, D.F. 96 pp. Consultado el 24/02/2022
https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2012/06/AtlasGeograficoSueloConservacionDF_2012.pdf
- González J. (2015). Series y Transformada de Fourier para Señales Continuas y Discretas en el Tiempo. *OmniaScience*. <https://doi.org/10.3926/oss.23>
- Hernández, M., Rovalo, M. y Tejado, M. (2021). *Manual de derecho ambiental mexicano*. Instituto de Investigaciones Jurídicas, UNAM. Consultado el 24/02/2022
<https://archivos.juridicas.unam.mx/www/bjv/libros/13/6429/13.pdf>
- ICHI (2021). Desmitificando la transformada de Fourier. Consultado el 24/02/2022
<https://ichi.pro/es/desmitificando-la-transformada-de-fourier-186460598097722>
- INE: Instituto Nacional de Ecología (2021). *Manual 3 Redes Estaciones y Equipos de Medición de la Calidad del Aire*. Consultado el 24/02/2022
<https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/3%20-%20Redes.%20Estaciones%20y%20Equipos%20de%20Medici%C3%B3n%20de%20a%20Calidad%20del%20Aire.pdf>
- INECC: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2007). *Historia del INE*. Consultado el 24/02/2022

<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/260/historia.html#:~:text=En%201972%20se%20crea%20la,que%20le%20otorg%C3%B3%20la%20Ley.&text=Esta%20Ley%20que%20sustituy%C3%B3%20a,entr%C3%B3%20en%20vigor%20en%201988>

- INECC: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2018). *Contaminantes climáticos de vida corta*. Consultado el 24/02/2022 <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/contaminantes-climaticos-de-vida-corta>
- INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2002). *Estadísticas del Medio Ambiente del Distrito Federal y Zona Metropolitana 2002*. Consultado el 24/02/2022, de <http://www.paot.org.mx/centro/inegi/amdf2002/archivo5.pdf>
- INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2017). *Encuesta Origen Destino en Hogares de la Zona Metropolitana del Valle de México*. Consultado el 24/02/2022 https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/eod/2017/doc/resultados_eod_2017.pdf
- INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2020). *Vehículos de motor registrados en circulación*. Consultado el 24/02/2022 https://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/proyectos/bd/continuas/transporte/vehiculos.asp?s=est&c=13158&proy=vmrc_vehiculos
- INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2021a). *Clima*, Ciudad de México. Consultado el 24/02/2022 <https://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/df/territorio/clima.aspx?tema=me&e=09#:~:text=Distrito%20Federal&text=En%20la%20mayor%20parte%20de,es%20de%2016%20C2%B0C>
- INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2021b) *Censo de población y vivienda 2020*. Consultado el 24/02/2022 <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- INPRFM: Instituto Nacional de Psiquiatría Ramón de la Fuente Muñiz (2017). Instituto Nacional de Psiquiatría Ramón de la Fuente Muñiz ; Instituto Nacional de Salud Pública, Comisión Nacional Contra las Adicciones, Secretaría de Salud. *Encuesta Nacional de Consumo de Drogas, Alcohol y Tabaco 2016-2017: Reporte de Tabaco*. Reynales- Shigematsu LM, Zavala-Arciniega L, Paz-Ballesteros WC, Gutiérrez-Torres DS, García-Buendía JC, Rodríguez-Andrade MA, Gutiérrez-Reyes, J., Franco-Núñez, A., Romero-Martínez, M. y Mendoza-Alvarado, L. Ciudad de México, México. Consultado el 24/02/2022 https://encuestas.insp.mx/ena/encodat2017/reporte_encodat_tabaco_2016_2017.pdf
- Jacobson, M. (2012). *Air Pollution and Global Warming: History, Science, and Solutions*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139109444.0020>
- Jaimes-López, J., Sandoval-Fernández, J., González-Ortíz, E., Zambrano-García, A., Llanos-Plata, M., y González-Macías, U. (2010). Potencial de formación de ozono de vehículos con gasolina reformulada en la Ciudad de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 22(4), 165-172. <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/21680>

- Jáuregui, E. (1983). Una primera estimación de las condiciones de difusión atmosférica en la República Mexicana. *Investigaciones geográficas*, 1(13), 9-51. <https://doi.org/10.14350/rig.58953>
- Jáuregui, E. (1984). La distribución espacial y temporal del monóxido de carbono en la ciudad de México, y su relación con algunos factores meteorológicos. *Investigaciones Geográficas*; Núm. 14. Consultado el 24/02/2022 <https://repositorio.unam.mx/contenidos/4119736>
- Jáuregui, E. (1988). Local wind and air pollution interaction in the Mexico basin. *Atmosfera*.1(3), pp.131-140. Consultado el 24/02/2022 <https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/25944>
- Jáuregui, E. (1995). Algunas alteraciones de largo periodo del clima de la ciudad de México debidas a la urbanización. Revisión y perspectivas. *Investigaciones Geográficas*, 1(31). <https://doi.org/10.14350/rig.59035>
- Jáuregui, E. (2000). *El clima de la Ciudad de México*. Temas selectos de geografía de México. UNAM. Consultado el 24/02/2022 <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/51>
- Jáuregui, E. (2004). Impact of land-use changes on the climate of the Mexico City Region. *Investigaciones Geográficas*; Núm. 55; 46. Consultado el 24/02/2022 <https://repositorio.unam.mx/contenidos/4119910>
- Jáuregui, E. y Luyando, E. (1992). Patrones de flujo de aire superficial y su relación con el transporte de contaminantes en el Valle de México. *Investigaciones geográficas*. (24), 51-78. Consultado el 24/02/2022 http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0188-46111992000100004&lng=es&nrm=iso
- Jerrett, M., Burnett R., Pope, C., Ito, K., Thurston, G., Krewski, D., Shi, Y., Calle, E. y Thun, M. (2009). Long-term ozone exposure and mortality. *New England Journal of Medicine*, 360(11), 1085-1095. <https://doi.org/10.1056/nejmoa0803894>
- Kampa, M., y Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. *Environmental pollution*, 151(2), 362-367. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.012>
- Klaus, D., and E. Jáuregui (1980) “Análisis espectral del Bioxido de Azufre en la Ciudad de México y su relación con algunos parámetros meteorológicos”. *Geofísica Internacional*, vol. 18, no. 3, July 1979, pp. 263-08, doi:10.22201/igeof.00167169p.1979.18.3.940.
- Lawrence M. (2019). *Digital Spectral Analysis*. Mineola, New York: Dover Publications, INC. ISBN 10: 0486837386
- Li, G., Bei, N., Tie, X., y Molina, L. (2011). Aerosol effects on the photochemistry in Mexico City during MCMA-2006/MILAGRO campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 5169-5182. <https://doi.org/10.5194/acp-11-5169-2011>
- Liu, C., Chen, R., Sera, F., Vicedo-Cabrera, A.M., Guo, Y., Tong, S., Coelho, M.S.Z.S., Saldiva, P.H.N., Lavigne, E., Matus, P., Valdes Ortega, N., Osorio Garcia, S., Pascal, M., Stafoggia, M., Scortichini, M., Hashizume, M., Honda, Y., Hurtado-Díaz, M., Cruz, J.,

- Nunes, B., Teixeira, J.P., Kim, H., Tobias, A., Íñiguez, C., Forsberg, B., Åström, C., Ragettli, M.S., Guo, Y.-L., Chen, B.-Y., Bell, M.L., Wright, C.Y., Scovronick, N., Garland, R.M., Milojevic, A., Kyselý, J., Urban, A., Orru, H., Indermitte, E., Jaakkola, J.J.K., Ryti, N.R.I., Katsouyanni, K., Analitis, A., Zanobetti, A., Schwartz, J., Chen, J., Wu, T., Cohen, A., Gasparrini, A. y Kan, H. (2019). Ambient Particulate Air Pollution and Daily Mortality in 652 Cities. *The NEW ENGLAND JOURNAL OF MEDICINE*. 381(8). <https://www.nejm.org/doi/full/10.1056/nejmoa1817364>
- Martínez, M., Salazar, A. y Gómez, E. (2018). Análisis de la acción pública derivado del Programa ambiental “Hoy No Circula” en Ciudad de México. *Vía Iuris*, (25), 1-35. Consultado el 24/02/2022 <https://www.redalyc.org/journal/2739/273960279006/html/>
- Meraz, M., Rodriguez, E., Echeverria, J. y Alvarez-Ramirez, J. (2015). Statistical persistence of air pollutants (O3,SO2,NO2 and PM10) in Mexico City. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 427(1),202-217. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2015.02.009>
- METEORED (2022). El ozono troposférico, calor, salud y medioambiente. Consultado el 24/02/2022 <https://www.tiempo.com/ram/342612/ozono-troposferico-calor-salud-medioambiente/>
- MILENIO (2017). *¿Cuántos muertos causó el terremoto de 1985?*. Consultado el 01/01/2022: <https://www.milenio.com/cultura/cuantos-muertos-causo-el-terremoto-de-1985>
- Molina, L., Foy, B., Vázquez, Ó., y Páramo, V. (2009). Calidad del aire, condiciones meteorológicas y climáticas en Ciudad de México. *Boletín de la OMM*, 58(1) pp. 48-53. Consultado el 24/02/2022 https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=6935
- NEXOS (2016). *40 años después: Sin soluciones*. Consultado el 1 01/01/2022 <https://www.nexos.com.mx/?p=28768>
- Nigenda, G., Cifuentes, E. y Duperval, P. (2002). *Estimación del valor económico de reducciones en el riesgo de morbilidad y mortalidad por exposiciones ambientales*. INE. Ciudad de México. Consultado el 24/02/2022 http://www2.inecc.gob.mx/dgipea/descargas/valor_eco_riesgos_mort.pdf
- Nuvolone, D., Petri, D. y Voller, F. (2018). The effects of ozone on human health. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(9), 8074-8088. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9239-3>
- OMS: Organización Mundial de la Salud (2006). *Guías de la Calidad del Aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Actualización mundial 2005. Ginebra, Suiza. Consultado el 24/02/2022 http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf;jsessionid=D0B8D77D72DA1E81AC9A47A07AD5C9DA?sequence=1
- ONU: Organización de las Naciones Unidas. (1973). *Informe de la conferencia de las naciones unidas sobre el medio humano*. Consultado el 24/02/2022 <https://www.dipublico.org/conferencias/mediohumano/A-CONF.48-14-REV.1.pdf>

- PAOT: Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial de la Ciudad de México. (2021). *El Suelo de Conservación del Distrito Federal*. Consultado el 24/02/2022 <http://www.paot.org.mx/centro/programas/suelo-corena.pdf>
- Raub, J., Mathieu-Nolf, M., Hampson, N., y Thom, S. (2000). *Carbon monoxide poisoning — a public health perspective*. *Toxicology*, 145(1), 1–14. [https://doi.org/10.1016/S0300-483X\(99\)00217-6](https://doi.org/10.1016/S0300-483X(99)00217-6)
- RETEMA (2018). Entendiendo el origen y evolución del monóxido de carbono en el aire que respiramos. Consultado el 24/02/2022 <https://www.retema.es/articulo/entendiendo-el-origen-y-evolucion-del-monoxido-de-carbono-en-el-aire-que-respiramos-1AF4C>.
- Riojas, H., Álamo, U., Texcalac, J. y Romieu, I. (2009). *Estado del conocimiento sobre los efectos en la salud asociados a la contaminación del aire en la población de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*. Informe final. Ciudad de México - Secretaría dl Medio Ambiente – ICyTDF – Instituto Nacional de Salud Pública. Consultado el 24/02/2022 http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/proaire-2011-2020-anexos/documentos/10-docs_estudio_salud.pdf
- Riveros, H., Tejeda, J., Ortiz, L., Julián-Sánchez, A. y Riveros-Rosas, H. (1995) Hydrocarbons and Carbon Monoxide in the Atmosphere of Mexico City. *Journal of the Air & Waste Management Association*. <https://doi.org/10.1080/10473289.1995.10467429>
- Rojas-Martinez, R., Perez-Padilla, R., Olaiiz-Fernandez, G., Mendoza-Alvarado, L., Moreno-Macias, H., Fortoul, T., McDonell, W., Loomis, D. y Romieu, I. (2007). Lung function growth in children with long-term exposure to air pollutants in Mexico City. *American journal of respiratory and critical care medicine*, 176(4), 377-384. <https://doi.org/10.1164/rccm.200510-1678oc>
- Salcido, A., Celada-Murillo, A. y Castro, T. (2010). A meso- β scale description of surface wind events in Mexico City during MILAGRO 2006 campaign. Presentación en Second IASTED International Conference on Environmental Management and Engineering EME. 15-17 de Julio, Banff, Alberta, Canada. Consultado el 24/02/2022 https://www.researchgate.net/profile/Alejandro-Salcido-2/publication/310606829_PPT_Presentation_A_meso-beta_scale_description_of_the_Mexico_City_surface_wind_events_during_MILAGRO_2006_campaign/links/58334e1808ae004f74c5aa50/PPT-Presentation-A-meso-beta-scale-description-of-the-Mexico-City-surface-wind-events-during-MILAGRO-2006-campaign.pdf
- SEDEMA: Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (1990). *Programa Integral contra la contaminación atmosférica de la zona metropolitana de la ciudad de México*. México: SEDEMA. Consultad el 24/02/2022 http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/gestion-ambiental-aire-memoria-documental-2001-2006/descargas/programa_integral_contra_la_contaminacion_atmosferica.pdf
- SEDEMA: Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (2006). *Gestión ambiental del aire en el Distrito Federal: Avances y propuestas 2000-2006*. Consultado el

24/02/2022 http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/gestion-ambiental-aire-memoria-documental-2001-2006/descargas/gaa_avances_propuestas_2000_2006.pdf

SEDEMA: Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (2016). *Suelo de conservación*. México. Dirección de Ordenamiento Ecológico del Territorio y Manejo Ambiental del Agua. Consultado el 24/02/2022 https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/Libro_Suelo_de_Conservacion.pdf

SEDEMA: Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (2017). *Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2016*. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico. Consultado el 24/02/2022 http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/informe-2016-calidad-del-aire-en-la-ciudad-de-mexico/mobile/informe_anual_calidad_aire_2016.pdf

SEDEMA: Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (2018a). *Inventario de Emisiones de la Ciudad de México 2016*. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Programas de Calidad del Aire e Inventario de Emisiones. Ciudad de México. Consultado el 24/02/2022 <http://www.sadsma.cdmx.gob.mx:9000/datos/storage/app/media/docpub/sedema/inventario-emisiones-2016.pdf>

SEDEMA: Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (2018b). *Análisis histórico de los beneficios en la salud de la población, asociados a la calidad del aire en la Ciudad de México entre 1990 y 2015*. Harvard T.H. CHAN. Consultado el 24/02/2022 <http://www.data.sedema.cdmx.gob.mx/beneficios-en-salud-por-la-mejora-de-la-calidad-del-aire/descargas/analisis-espanol.pdf>

SEDEMA: Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (2020). *Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2018*. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire. Consultado el 24/02/2022 <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/informe-anual-calidad-del-aire-2018.pdf>

SEDEMA: Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (2021a). *Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2018*. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Proyectos de Calidad del Aire. Ciudad de México. Consultado el 24/02/2022 <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventario-emisiones-cdmx-2018/Inventario-de-emisiones-cdmx-2018.pdf>

SEDEMA: Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (2021b). *Historia del monitoreo de la calidad del aire en la Ciudad de México*. Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. Consultado el 24/02/2022 <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/simat-cartel-linea-tiempo.pdf>

SEDEMA: Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (2021c). *Índice de Aire y Salud*. Consultado el 24/02/2022 <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnmI=&dc=%27Zw==>

- SEDEMA: Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (2021d). *El monitoreo de la calidad del aire*. De: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnmI=%27>
- SEDEMA: Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (2021e). *Monitoreo de contaminantes criterio*. Consultado el 24/02/2022 <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnmI=&dc=%27Yg==#:~:text=El%20principio%20de%20operaci%C3%B3n%20de,m%C3%A9todo%20de%20referencia%20o%20equivalente>.
- SEDEMA: Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (2021f). *Estaciones de monitoreo*. De: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnmI=%27&dc=ZA==>
- SEDEREC: Secretaría De Desarrollo Rural Y Equidad Para Las Comunidades (2018). *Sexto Informe de gobierno*. Consultado el 24/02/2022 <https://www.transparencia.cdmx.gob.mx/storage/app/uploads/public/5bd/88f/db6/5bd88fdb6da8c895044804.pdf>
- SEMARNAP: Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (2000). *Protegiendo al ambiente Políticas y gestión institucional*. Primera edición. México. ISBN 968-817-463-7. Consultado el 24/02/2022 http://centro.paot.org.mx/documentos/ine/protegiendo_ambiente.pdf
- SEMARNAT: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2018). *Fuentes de Contaminación Atmosférica*. Consultado el 24/02/2022 <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/fuentes-de-contaminacion-atmosferica>
- SEMARNAT-INE: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales - Instituto Nacional de Ecología (2011). *Guía metodológica para la estimación de emisiones de PM2.5*. Ciudad de México. Consultado el 24/02/2022 <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/225459.pdf>
- SEMOVI: Secretaría de movilidad de la Ciudad de México (2021). *Programa Integral de Movilidad de la Ciudad de México 2020-2014, Diagnostico Técnico*. Consultado el 24/02/2022 <https://www.semovi.cdmx.gob.mx/storage/app/media/uploaded-files/diagnostico-tecnico-de-movilidad-pim.pdf>
- SENER: Secretaría de Energía. (2018). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2018-2032*. Consultado el 24/02/2022 <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/331770/PRODESEN-2018-2032-definitiva.pdf>
- Sibón A., Martínez-García, P., Vizcaya M. y Romero JL. (2007). Intoxicación por Monóxido de Carbono. *Cuadernos de Medicina Forense*. 13(47):65-69. https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1135-76062007000100007
- SMN: Servicio Meteorológico Nacional (2021). *Resúmenes Mensuales de Temperaturas y Lluvia*. Consultado el 24/02/2022 <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>

- Soto, N. (2017). El control de la contaminación atmosférica en México (1970-1980): tensiones y coincidencias entre el sector salud y los industriales. *Dynamis*, 37(1), 187-209. <https://raco.cat/index.php/Dynamis/article/view/318890/409118>
- Spengler, J. y Wilson, R. (1996). *Particles in our air: concentrations and health effects*. Harvard University Press.
- Stoica, P. y Moses, R. (2005). *SPECTRAL ANALYSIS OF SIGNALS*. New Jersey: Prentice Hall. ISBN 0-13-113956-8
- Stull, R. (1988). *An introduction to boundary layer meteorology*, volume 13. Springer Science and Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3027-8>
- Thom, S. (2002). Hyperbaric-Oxygen Therapy for Acute Carbon Monoxide Poisoning. *New England Journal of Medicine*, 347(14), 1105–1106. <https://doi.org/10.1056/nejme020103>
- Todoesquímica (2022). Formación de la lluvia ácida. Consultado el 24/02/2022 <https://todoesquimica.blogia.com/2008/040201-formacion-de-la-lluvia-cida.php>
- Torres-Ramos, Y. Montoys-Estrada, A. y Hick, J. (2009). La disfunción del eritrocito en la hipoxia tisular en pacientes con EPOC y su relación con estrés oxidativo. *Revista del Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias*, 22(4), 356-365. Consultado el 24/02/2022 <https://www.medigraphic.com/pdfs/iner/in-2009/in0941.pdf>
- Trauth, M. (2021). *MATLAB® Recipes for Earth Sciences*. Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-38441-8>
- UAP: Urban Air Purifier (2021) Tweet de @uapairpurifier del 16 de junio de 2021: ¿Cuáles son los principales #contaminantes presentes en el aire de las ciudades que destruye nuestro #purificador? #PM #SO2 #CO #COV #No2 Fuente: Protección Civil UNAM. Consultado el 24/02/2022 <https://mobile.twitter.com/uapairpurifier/status/1405068957980233728>
- Ugalde, V. (2020). La verificación vehicular en la Ciudad de México: una mirada sobre su implementación. *Estudios demográficos y urbanos*, 35(3), 573-597. <https://doi.org/10.24201/edu.v35i3.1914>
- Velázquez, F. y Jiménez, S. (2007). La contaminación por ozono troposférico. El caso de Motril (Granada). *Observatorio Medioambiental*, (10), 265-280. <https://revistas.ucm.es/index.php/OBMD/article/view/OBMD0707110265A>
- WHO: World Health Organization Europe (2005). *Air Quality Guidelines. Global Update 2005: Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide*. Consultado el 24/02/2022 https://www.euro.who.int/data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf
- Zavala, M. (2014) La transición demográfica de 1895-2010: ¿una transición original? En Rabell-Romero, C. (coord.) *Los mexicanos Un balance del cambio demográfico* (pp. 80-114). Fondo de Cultura Económica.