



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO
FACULTAD DE MEDICINA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**DIRECCIÓN GENERAL DE
EPIDEMIOLOGÍA**

**ASOCIACIÓN ENTRE LA MORTALIDAD POR
COVID-19 Y LA EXPOSICIÓN A MATERIAL
PARTICULADO PM_{2.5} EN LA ZONA
METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO
DURANTE EL PERIODO 2020 A 2021**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL
TÍTULO DE ESPECIALISTA
EN:
EPIDEMIOLOGÍA

PRESENTA:
DIANA VIDAL AGUIRRE

DIRECTOR DE TESIS:
ALESSIO DAVID SCORZA GAXIOLA

ASESORES PRINCIPALES:
**JOSÉ LUIS TEXCALAC SANGRADOR
ALAN GARCÍA ZAMBRANO**



Ciudad Universitaria, CD. MX., 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a mi familia quien siempre me ha apoyado en mis metas y objetivos tanto personales como académicos, y por ser un soporte emocional durante los tres años de residencia, así como para la culminación de este trabajo.

Agradezco a mi director y asesores por su tiempo y paciencia brindados para la elaboración de esta tesis.

Y por último agradezco a mis amigos y compañeros de la residencia por hacer más ligeros estos años de estudio, por su apoyo y por las experiencias compartidas.

GLOSARIO

AGEB: Área geoestadística básica

CAME: Comisión Ambiental de la Megalópolis

COVID-19: enfermedad por coronavirus

ECA2: enzima convertidora de angiotensina II

FCR: Función Concentración-Respuesta

InDRE: Instituto de Diagnóstico y Referencia Epidemiológicos

$\mu\text{g}/\text{m}^3$: microgramos por metro cúbico

OMS: Organización Mundial de la Salud

PM: material particulado

PM_{2.5}: material particulado, cuyas partículas tienen un diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 μm .

RAMA: Red Automática de Monitoreo Atmosférico

REDDA: Red de Depósito Atmosférico

REDMA: Red Manual de Monitoreo Atmosférico

REDMET: Red de Meteorología y Radiación Solar

SIMAT: Sistema de Monitoreo Atmosférico

SINAICA: Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire

SINAVE: Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica

SISVER: Sistema de Vigilancia Epidemiológica de Enfermedad Respiratoria Viral

ZMVM: Zona Metropolitana del Valle de México

CONTENIDO

RESUMEN.....	5
INTRODUCCIÓN.....	6
MARCO CONCEPTUAL.....	8
Contaminación Ambiental.....	8
Contaminación del Aire.....	8
Contaminantes.....	8
Factores geográficos y topográficos que intervienen en la dinámica de dispersión de los contaminantes en la Zona Metropolitana del Valle de México.	8
Fuentes de emisión.	9
Tipos de contaminantes.....	9
Contaminantes criterio.....	9
Material particulado.	10
PM _{2.5}	10
Normatividad.....	15
Normatividad internacional.	15
Normatividad nacional.	15
Concentraciones máximas de PM _{2.5} registradas por ciudad y zona metropolitana.	17
Tendencias de las concentraciones de PM _{2.5} en la ZMVM.	17
Contingencias Ambientales Atmosféricas.....	19
Contingencia Ambiental Atmosférica Extraordinaria en el Valle de México.....	20
Impacto de la pandemia de COVID-19 en la calidad de aire.	21
Monitoreo Atmosférico.	22
COVID-19.	25
Situación en México.....	25
Virus SARS-CoV-2.	28
Vigilancia Epidemiológica de la Enfermedad Respiratoria Viral en México.	29
Relación entre contaminación del aire y COVID-19.....	31
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	34
PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	34
JUSTIFICACIÓN.....	35
OBJETIVOS.....	37
Objetivo general.....	37
Objetivos específicos.	37
HIPÓTESIS.....	37
MÉTODOS.....	38

Tipo y diseño de estudio.....	38
Fuentes de datos.	38
Universo de estudio.....	39
Unidad de análisis y observación.....	39
Selección y tamaño de la muestra.	39
Criterios de eliminación.....	39
Definición de variables.	40
Operacionalización de variables.....	40
Plan de análisis.	42
RESULTADOS.	43
Defunciones por COVID-19 en la ZMVM.....	43
CONCENTRACIONES DE PM _{2.5} EN LA ZMVM.	47
ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS.....	56
DISCUSIÓN.....	70
CONCLUSIONES.....	72
LIMITACIONES.	73
CONSIDERACIONES ÉTICAS.....	74
RECURSOS.....	76
Humanos.....	76
Materiales.	76
Financieros.....	76
CRONOGRAMA.....	77
REFERENCIAS.....	78
ANEXOS.....	86

RESUMEN

Título. Asociación entre la mortalidad por COVID-19 y la exposición a material particulado $PM_{2.5}$ en la Zona Metropolitana del Valle de México durante el periodo 2020 a 2021.

Antecedentes. La Organización Mundial de la Salud estima que una gran proporción de la población habita en zonas con altas concentraciones de contaminantes. Desde el inicio de la pandemia de COVID-19 estudios han asociado la mortalidad por esta enfermedad con la exposición a contaminantes en el aire, principalmente en grandes ciudades. En nuestro país, la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) es considerada como una de las regiones con la peor calidad del aire y dos de los estados que la conforman, la Ciudad de México y el Estado de México, han sido las entidades con mayor número de defunciones reportadas por COVID-19 desde el inicio de la misma.

Objetivo. Determinar la asociación entre la mortalidad por COVID-19 y la exposición a $PM_{2.5}$ en la Zona Metropolitana del Valle de México durante el periodo del 2020 al 2021.

Material y métodos: Se realizó un estudio ecológico de series de tiempo mediante un modelo de regresión de Poisson, en el cual se compararon las defunciones diarias por COVID-19 con las variaciones temporales de las concentraciones promedio de $PM_{2.5}$ para investigar si los cambios diarios en la mortalidad están relacionados con los niveles diarios de $PM_{2.5}$, en la ZMVM durante el periodo del 2020 a 2021.

Resultados: Se encontró un incremento del 1 % (IC95 %: 0.41 % - 1.6 %) y del 1.11 % (IC95 %: 0.09 % - 2.2 %) en el número de defunciones por COVID-19 en la ZMVM y en la zona Sureste respectivamente, por cada incremento de $1 \mu g/m^3$ en las concentraciones diarias de $PM_{2.5}$ durante el periodo de estudio.

Conclusiones: Existe una asociación entre la exposición a corto plazo entre las defunciones diarias por COVID-19, en la ZMVM a nivel general y de manera específica en la zona Sureste, y las concentraciones diarias de $PM_{2.5}$ promediadas en 24 horas durante el periodo del 1° de marzo de 2020 al 31 de diciembre de 2021.

Palabras clave: COVID-19; SARS-CoV-2; defunciones; mortalidad; contaminación atmosférica; material particulado; $PM_{2.5}$.

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia se han registrado los efectos de la contaminación sobre la calidad del aire y las poblaciones humanas. Desde la Grecia y Roma antiguas, por las prácticas de minería y fundición de plomo y plata (1), hasta la Revolución Industrial en Europa y América del Norte (2). Uno de los eventos mejor conocidos es la famosa “Gran Niebla de Londres”, que se estableció entre el 5 y el 9 de diciembre de 1952 como una gruesa capa de vapores producto de las fábricas de carbón, ocasionando un aumento en las admisiones a hospitales, reportes de neumonía, ingresos a urgencias y un aumento en la mortalidad que se mantuvo meses posteriores a su aparición, considerándola responsable de aproximadamente 12,000 defunciones durante un periodo de tres meses (3).

De acuerdo con estimaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) siete millones de muertes se pueden atribuir al efecto de la contaminación del aire (4), y se ha relacionado su exposición con diversos desenlaces en la salud (5,6).

El estudio de la Carga Mundial de las Enfermedades posicionó a la contaminación ambiental dentro de los cinco principales riesgos de defunción atribuible durante 2019, con 2.92 millones de muertes atribuibles para mujeres y 3.75 millones de muertes atribuibles para hombres. En este estudio, el Instituto de Métricas y Evaluación de la Salud (IHME) de la Universidad de Washington ubicó a la contaminación del aire como el noveno factor de riesgo de muerte y discapacidad en México (7).

Algunos de los contaminantes que se han asociado con la mortalidad corresponden al material particulado debido a la capacidad que tiene para absorber componentes tóxicos del aire e ingresar a los pulmones (8). La OMS ha establecido que el 91% de la población habita en áreas donde las concentraciones de estos contaminantes se encuentran por arriba de los límites recomendados (9), siendo las concentraciones de contaminación mayores en los países en desarrollo y en las grandes ciudades en comparación con los países desarrollados y las áreas rurales (6,10), lo que determina que un gran número de personas se encuentre en riesgo de presentar daños a su salud.

La contaminación del aire afecta a todas las personas, sin embargo, ciertos grupos son más vulnerables a los efectos en la salud que otros. Las poblaciones con bajo nivel socioeconómico suelen estar expuestas a una mayor concentración de contaminantes por habitar en áreas de mayor densidad de tránsito o cerca de fuentes puntuales de

contaminación, como centrales eléctricas e instalaciones industriales. Otros factores incluyen ausencia de espacios verdes, mala condición de las viviendas y falta de acceso a los servicios de salud. Otras poblaciones vulnerables comprenden a los menores de edad, los adultos mayores, aquellos con comorbilidades, como asma o enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), y mujeres embarazadas (11).

La contaminación del aire se ha relacionado previamente con la intensificación de la mortalidad en pandemias anteriores, como lo fue con la “influenza española” en 1918, donde se observó un aumento del 10% en la mortalidad en las ciudades productoras de carbón (9). Algo similar se observó durante la pandemia del Síndrome Respiratorio Agudo Grave (SARS) en 2003, donde se observó que la exposición a concentraciones de moderadas a altas de contaminación aumentó el riesgo de morir (12). Del mismo modo, durante la pandemia de influenza A(H1N1) en 2009, se determinó que la contaminación por PM₁₀ formó parte de los determinantes que impactaron en la mortalidad (13).

En las últimas dos décadas los coronavirus han originado tres grandes brotes. El Síndrome Respiratorio Agudo Grave identificado en China en el 2002, el Síndrome Respiratorio de Oriente Medio (MERS) identificado en Arabia Saudita en 2011 y recientemente la Enfermedad por coronavirus (COVID-19), también detectada en China en 2019 (14).

En relación con este último, los países con mayor afectación por la pandemia de COVID-19 han correspondido con aquellos con una mayor concentración de contaminantes en el aire, como China, Italia, Estados Unidos y México (15–18).

MARCO CONCEPTUAL

CONTAMINACIÓN AMBIENTAL.

La contaminación ambiental consiste en la acumulación de agentes químicos o físicos por encima de sus niveles normales en un medio ambiental (aire, agua, suelo) o ajenos a estos, los cuales ocasionan efectos adversos sobre la salud, el bienestar humano y el medio ambiente (19,20).

Contaminación del Aire.

Por otra parte, la contaminación del aire se define como la presencia en la atmósfera de sustancias en concentraciones, tiempo y circunstancias que pueden resultar nocivas para el ser humano, animales, plantas o el suelo (21), ya sea por las actividades del hombre o por acciones naturales, e incluye la contaminación del aire interior o doméstico y del exterior (22).

Contaminantes.

La contaminación atmosférica consiste en la mezcla de diferentes compuestos en el aire entre los que se encuentran el ozono (O_3), el dióxido de nitrógeno (NO_2), el dióxido de azufre (SO_2), el material particulado (PM), compuestos orgánicos volátiles como el benceno y metales pesados (23).

Factores geográficos y topográficos que intervienen en la dinámica de dispersión de los contaminantes en la Zona Metropolitana del Valle de México.

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) conformada por 16 alcaldías de la Ciudad de México, 59 municipios del Estado de México y el municipio de Tizayuca del estado de Hidalgo (24) cuenta con ciertas características geográficas y climatológicas que favorecen la retención de contaminantes en la atmósfera urbana (ver Tabla 1): se encuentra rodeada por un sistema montañoso que funciona como barrera, impidiendo una adecuada circulación del viento y la dispersión de los contaminantes; la temperatura del aire y el gradiente vertical de temperatura pueden dar lugar a situaciones de inversión térmica, lo cual ocasiona un estancamiento temporal de las masas de aire en la atmósfera, siendo más frecuente durante el invierno; los sistemas anticiclónicos en la región centro de México tienen la capacidad de generar estabilidad atmosférica en áreas extensas y la radiación solar favorece las reacciones entre precursores de contaminantes (21,25,26).

Tabla 1. Efectos del clima y topografía en la contaminación del aire.

Característica	Efecto
Precipitación	Limpia el aire
Humedad	Disuelve muchos contaminantes
Radiación solar	Inicia formación de esmog fotoquímico
Viento	Disminuye contaminación cercana de la fuente, pero la transporta a otras regiones
Presión atmosférica	Presiones altas mantienen la contaminación en un área
Montañas y colinas	Afecta dispersión de contaminantes por reducción de vientos
Valles	Atrapa los contaminantes

Tomada de Echeverri, 2019.

Fuentes de emisión.

La emisión de los contaminantes puede provenir de fuentes naturales como el polvo, polen, esporas, rocío marino, materia orgánica, incendios forestales y volcanes; y de fuentes antropogénicas, como la quema de combustibles para generación de energía y en estufas de cocina y calefacción, actividades industriales y agrícolas, erosión del pavimento, consumo de tabaco y fuentes móviles como el transporte público, privado y comercial. Estas últimas contribuyeron en 2016 con 7,295,762.07 toneladas (22,27,28).

Tipos de contaminantes.

Cuando los contaminantes se liberan de manera directa a la atmósfera, generalmente de fuentes industriales o de transporte, se les denomina “contaminantes primarios”. Se incluyen el material particulado, los compuestos de azufre, óxidos de nitrógeno, óxidos de carbono, compuestos orgánicos, compuestos halogenados y los metales pesados. De igual manera, se pueden encontrar contaminantes que se forman en la atmósfera a partir de otros mediante reacciones químicas, a los que se les conoce como “contaminantes secundarios”. Tal es el caso del O₃ que se forma a partir de óxidos de nitrógeno e hidrocarburos; del ácido sulfúrico que se produce a partir del azufre y los aerosoles de nitrato de amonio que se crean a partir de los gases de óxido de nitrógeno (29,30).

Contaminantes criterio.

Los contaminantes criterio son aquellos que afectan el bienestar y la salud humana y a los ecosistemas, y se utilizan para determinar si el aire se encuentra contaminado o no (21,31).

Están regulados por la normatividad mexicana, y cuentan con criterios para establecer un límite máximo de concentración en el aire ambiente, estos son el SO_2 , el CO , el NO_2 , el O_3 y el PM (32).

Material particulado.

El material particulado (PM) consiste en una combinación de sólidos y líquidos suspendidos, que pueden variar en tamaño, composición química, propiedades físicas y biológicas que varían de acuerdo con el lugar y el tiempo (33).

Estas partículas se dividen de acuerdo con su tamaño o diámetro aerodinámico en partículas gruesas, conocidas también como fracción respirable, que cuentan con un diámetro aerodinámico de $10\ \mu\text{m}$ (PM_{10}) y las partículas finas, con un diámetro aerodinámico menor de $2.5\ \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$). Estas últimas incluyen a las partículas ultrafinas que son aquellas menores de $0.1\ \mu\text{m}$ (Ver Ilustración 1) (6,33–35).

Ilustración 1. Comparaciones de tamaño para partículas suspendidas.



Tomada de la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA), 2020.

$\text{PM}_{2.5}$

Componentes.

La composición de las $\text{PM}_{2.5}$ depende de la fuente de emisión, el lugar y las condiciones medioambientales. Los principales componentes incluyen carbono orgánico y elemental, hidrocarburos reactivos (denominados compuestos orgánicos volátiles), minerales, iones inorgánicos como óxidos de azufre (principalmente como SO_2), óxidos de nitrógeno (principalmente óxido nítrico y NO_2), y CO , así como material biológico como endotoxinas,

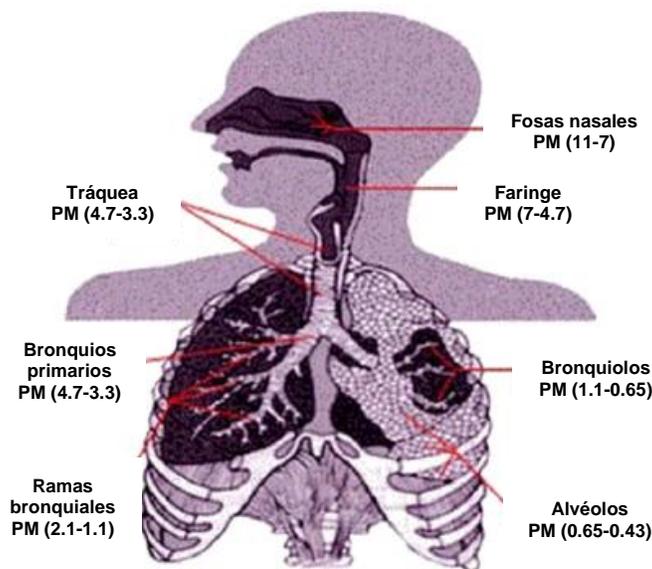
fragmentos celulares, alérgenos, bacterias, esporas fúngicas y virus. Otros componentes que pueden estar presentes son otros iones inorgánicos como amonio, sodio, potasio, calcio, magnesio y cloruro; agua ligada a las partículas y metales como hierro, cobre, níquel, zinc y vanadio (6,10,35).

Efectos en la Salud.

Si bien este estudio se enfoca en las $PM_{2.5}$, como ya se mencionó, en una zona contaminada la exposición ocurre a la mezcla de diversos contaminantes. Esa mezcla no puede ser evaluada, dado que la contaminación del aire consiste en un fenómeno dinámico. Ahora bien, los efectos de $PM_{2.5}$ en la salud, tanto en interiores como en exteriores, han sido motivo de gran preocupación debido a que no existe una concentración mínima que se considere segura (6,8,11,36), incluso se han reportado efectos en la salud a concentraciones muy bajas ($3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (35).

Las $PM_{2.5}$ tienen la capacidad de ingresar a través de las vías respiratorias gracias a su tamaño. Mientras más pequeñas sean más penetrarán para depositarse en el sistema respiratorio (Ver Ilustración 2). Las $PM_{2.5}$, también son conocidas como fracción alveolar, debido a que son retenidas en gran medida en el pulmón, representando el 96% de las partículas observadas en el parénquima pulmonar humano (36), posteriormente las partículas pueden penetrar el pulmón y escapar al torrente sanguíneo (6,11,35,36).

Ilustración 2. Depósito de partículas en las vías respiratorias de acuerdo con su tamaño en μm .



Modificada de Kim KH, 2015.

Estudios y revisiones han evidenciado los efectos adversos a la salud por la exposición a corto y largo plazo a las PM_{2.5}, las cuales se han asociado con el aumento en las defunciones diarias, de admisiones hospitalarias, visitas al servicio de urgencias y de mortalidad prematura (5,6,11).

Al ser el sistema respiratorio la principal vía de ingreso, el pulmón es el principal objetivo de la toxicidad de estos contaminantes. El depósito de PM_{2.5} provoca lesión del tejido pulmonar debido a la respuesta inflamatoria, al inducir la liberación de citosinas como la interleucina 1 (IL-1), interleucina 6 (IL-6) y el factor de necrosis tumoral alfa (TNF- α por sus siglas en inglés); de igual manera se incrementa la permeabilidad epitelial y disminuye la producción de surfactante. Esto además de ocasionar una disminución de la función pulmonar que puede agravar enfermedades pulmonares crónicas como la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), el asma y la rinitis (5,6,29,35–37), puede alterar la respuesta inmunitaria incrementando la susceptibilidad a las infecciones respiratorias de origen bacteriano y viral, al ocurrir alteración de la fagocitosis mediada por macrófagos alveolares junto con la presentación de antígenos, el deterioro de la respuesta de las células *natural killer* y linfocitos T citotóxicos, así como la generación de estrés oxidativo, el cual juega un papel importante en el daño al ADN (9,36,38) .

Otro sistema que se puede ver afectado por las PM_{2.5} es el sistema cardiovascular. Se han descrito efectos agudos y crónicos posteriores a la exposición (6,36), como inducción en el desarrollo de aterosclerosis e hipertensión por mecanismos desencadenados por la inflamación, como el incremento del tono simpático, disfunción endotelial, alteraciones en la coagulación y viscosidad de la sangre que resultan en vasoconstricción, aumento de la resistencia vascular y disminución del flujo sanguíneo (11,36). Por consiguiente, se incrementa el riesgo para desarrollar anginas, arritmias, eventos cerebrovasculares, infartos agudos de miocardio e insuficiencia cardíaca congestiva (11).

De acuerdo con Elder y colaboradores, otra ruta de exposición a considerar es la vía olfatoria (39), que permite una interacción directa entre las PM_{2.5} y el sistema nervioso central, causando alteración en la frecuencia cardíaca y en los patrones de respiración por disfunción del sistema nervioso autónomo (6,36,37).

Entre otros efectos, se ha correlacionado la contaminación ambiental con el desarrollo de diabetes mellitus en adultos e incremento en la mortalidad en estos pacientes; con bajo peso al nacer, partos pretérmino, desarrollo de preeclampsia y a muertes fetales y

neonatales posterior a la exposición en mujeres embarazadas; y con el riesgo de desarrollar asma y susceptibilidad a infecciones en niños con exposición a altas concentraciones (6,11,36,37).

Las altas concentraciones de $PM_{2.5}$ también se han asociado con la mortalidad (37). Se ha estimado que el 3% de las defunciones por causas cardiopulmonares se pueden atribuir a las partículas suspendidas (6). Liu observó que un aumento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de la concentración de $PM_{2.5}$ se asoció con un aumento en la mortalidad diaria por causas cardiovasculares y pulmonares en un 0.55% y 0.74% respectivamente, y en un 0.68% para todas las causas (8). Esta misma concentración se ha asociado con aumento de 1.18 en el riesgo de morir por enfermedad isquémica del corazón (37).

Por otra parte, a pesar de conocer cómo afectan las $PM_{2.5}$ a la salud del ser humano, permanecen siendo inciertos algunos de los efectos relacionados con los elementos que las conforman, ya que estudios epidemiológicos y experimentales han demostrado que no todas las partículas son igualmente tóxicas (5,36,40). Por ejemplo, las partículas con presencia de dióxido de azufre son más nocivas debido a su acidez, y pueden ocasionar daño tisular por contacto (11). Igualmente, el hierro puede incrementar la producción de especies reactivas de oxígeno con un consecuente daño celular y tisular (6). De hecho, se ha identificado al estrés oxidativo como el principal efecto de la toxicidad de estas partículas cuya intensidad depende del tamaño del material particulado fino, así como de sus componentes (10).

Evaluaciones de impacto en salud.

Un análisis de impacto en salud es, de acuerdo con la OMS, “una combinación de procedimientos, métodos y herramientas con los que puede ser juzgada una política, un programa o un proyecto, en relación a sus potenciales efectos en la salud de la población, y acerca de la distribución de esos efectos dentro de la misma población” (41). Este tipo de evaluaciones han permitido realizar la estimación de la mortalidad evitable asociada a la exposición a contaminantes atmosféricos.

Respecto a las $PM_{2.5}$, Trejo González et al. observaron que la reducción del promedio anual de $PM_{2.5}$ a $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ hubiera evitado 14.666 muertes y 150.771 años potenciales de vida perdidos en 2015 y que reducir la concentración de este contaminante en las ciudades mexicanas analizadas en su estudio reduciría la mortalidad por todas las causas en un 8.1% (42).

Por su parte, la Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), realizó una estimación de impactos en salud por contaminación atmosférica en la Región Centro de México, donde se cuantificó el número de defunciones prematuras que podrían evitarse de manera anual si se redujeran las concentraciones de contaminantes atmosféricos en los municipios que pertenecen a dicha región. Este estudio determinó que podrían evitarse entre 36 y 41 defunciones por causas generales por cada 100,000 habitantes si las concentraciones anuales de $PM_{2.5}$ se redujeran a $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente (43).

NORMATIVIDAD.

Diversas agencias a nivel nacional como internacional han establecido normas y directrices para regular las concentraciones de PM_{2.5} con el fin de reducir estos efectos, así como para determinar la calidad del aire (4).

Normatividad internacional.

A nivel internacional la OMS es quien a través de sus “Directrices mundiales sobre la calidad del aire” recomienda los valores de concentración de los contaminantes criterio, incluidas las partículas PM_{2.5}. En su última actualización realizó una reducción de sus niveles recomendados (Ver Tabla 2), debido a la mayor evidencia del daño que provoca la contaminación a la salud en concentraciones aún más bajas de lo que se suponía (4).

En la Unión Europea los “Estándares de la Calidad del Aire” de la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA por sus siglas en inglés) son menos estrictos (Ver Tabla 2) que los de la OMS, que únicamente establecen un límite anual de 25 µg/m³ (44,45).

La Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés) se encarga de regular las partículas inhalables en los EE. UU. Cuenta con estándares primarios (basados en la protección de la salud pública) y secundarios (basados en la protección del bienestar público, haciendo referencia a efectos en la visibilidad, el clima y en los materiales) para PM_{2.5}. Los valores límite para los promedios anuales corresponden a niveles de 12 µg/m³ para los estándares primarios y 15 µg/m³ para los estándares secundarios; los valores límite para el promedio de 24 horas corresponde a niveles de 35 µg/m³ (46).

Por su parte, en China los “Estándares de calidad del aire ambiental” establecen los valores para las concentraciones de PM_{2.5} e incluye dos clases de valores límite. Los estándares de Clase 1 se aplican a regiones especiales como parques nacionales, con el fin de proteger el entorno ecológico natural y la riqueza material social. Los estándares de Clase 2 se aplican a las áreas urbanas e industriales con el objetivo de proteger la salud pública (47).

Normatividad nacional.

En México la Norma Oficial Mexicana “NOM-025-SSA1-2014” establecía que las autoridades sanitarias son las responsables de establecer las normas, de tomar las medidas y de realizar actividades con el fin de proteger la salud humana ante los riesgos y daños dependientes de las condiciones ambientales. También establecía los valores límite permisibles de concentración de partículas suspendidas PM_{2.5} para efectos de protección

de la salud de la población más vulnerable (48). Debido a que los valores límite establecidos en esta norma eran mayores a los establecidos por las guías de calidad del aire de la OMS, se realizó una actualización, publicándose la “NOM-025-SSA1-2021”, con el objetivo de alcanzar de manera gradual las concentraciones recomendadas por la OMS, la cual entró en vigor el 27 de octubre de 2021 (49). Sin embargo, a pesar de que hubo una disminución de los valores límite para la concentración ambiental de las PM_{2.5}, las concentraciones objetivo continúan estando por arriba de las recomendadas por la OMS.

En la Tabla 2 se muestran los promedios de 24 horas y los promedios anuales para las PM_{2.5} de acuerdo con agencias internacionales, nacionales y las establecidas en México.

Tabla 2. Valores límite para concentraciones ambientales de PM_{2.5} en µg/m³.

Agencia/País	Promedio de 24 horas (µg/m³)	Promedio anual (µg/m³)	Referencia
OMS	75 (OI-1)	35 (OI-1)	OMS, 2021
	50 (OI-2)	25 (OI-2)	
	37.5 (OI-3)	15 (OI-3)	
	25 (OI-4)	10 (OI-4)	
	15	5	
México	45	12	NOM, 2014
	41 (1° año)	10 (1° año)	NOM, 2021
	33 (3° año)	10 (3° año)	
	25 (5° año)	10 (5° año)	
EPA	-	15 (estándar secundario)	EPA, 2020
	35	12 (estándar primario)	
EEA	-	25	EEA, 2008
China	35 (Clase 1)	15 (Clase 1)	GB 3095-2012
	75 (Clase 2)	35 (Clase 2)	

OI – Objetivo intermedio.

Modificada de Mukherjee, 2017

CONCENTRACIONES MÁXIMAS DE PM_{2.5} REGISTRADAS POR CIUDAD Y ZONA METROPOLITANA.

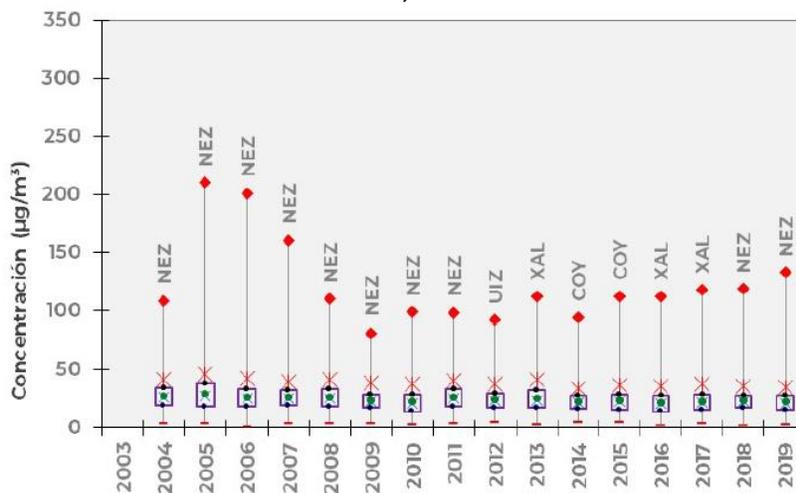
De acuerdo con el Informe Nacional de Calidad del Aire del 2019 las concentraciones más altas de PM_{2.5} como promedio de 24 horas se presentaron en el Área Metropolitana de Monterrey (AMM) con 209 µg/m³, la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) con 173 µg/m³, la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) con 133 µg/m³, Irapuato con 129 µg/m³, Celaya con 119 µg/m³, Tijuana con 117 µg/m³, Salamanca con 113 µg/m³, Cuernavaca con 107 µg/m³, Puebla con 92 µg/m³ y Mexicali con 88 µg/m³, las cuales fueron superiores al límite normado de 45 µg/m³ de acuerdo con la “NOM-025-SSA1-2014”, vigente durante 2019 (50).

En relación con los promedios anuales de PM_{2.5} los más elevados se registraron en Tijuana (37 µg/m³), la ZMVT (35 µg/m³), la ZMVM (28 µg/m³), el AMM (26 µg/m³), Minatitlán (25 µg/m³), Mexicali (22 µg/m³), Salamanca (22 µg/m³), Puebla (21 µg/m³), León (20 µg/m³) y Cuernavaca (20 µg/m³), los cuales fueron superiores al límite de 12 µg/m³ de acuerdo también, con la “NOM-025-SSA1-2014” (50).

TENDENCIAS DE LAS CONCENTRACIONES DE PM_{2.5} EN LA ZMVM.

En el periodo que comprendieron los años del 2003 al 2019 la concentración mínima y promedio de PM_{2.5}, así como los percentiles 10 y 90 se mantuvieron con muy poca variación. Por otra parte, las concentraciones máximas presentaron una tendencia hacia el aumento entre 2014 y 2019 (Ver Ilustración 3) (50).

Ilustración 3. Tendencias de las concentraciones diarias de PM_{2.5} en la Ciudad de México y su zona conurbada, 2003-2019.



Tomada del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2020.

De acuerdo con el Informe Nacional de Calidad del Aire de 2019, las concentraciones de $PM_{2.5}$ se encontraron por encima del límite máximo de 24 horas en la ZMVM el 8.5% de los días de ese mismo año, de acuerdo con la NOM del 2014, vigente en ese momento (50).

Para la Ciudad de México y su zona conurbada, la concentración más alta de acuerdo con la NOM del 2014, para el promedio de 24 horas y el promedio anual se registró en la estación de Nezahualcóyotl (NEZ), siendo de $133 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, representando un incremento de 3 y 2.3 veces el límite establecido. Además, las estaciones Santiago Acahualtepec (SAC), Camarones (CAM) y Xalostoc (XAL) fueron las que con mayor frecuencia superaron el límite normado de 24 horas durante ese año. Las concentraciones más altas de $PM_{2.5}$ se presentaron durante abril y mayo (50).

CONTINGENCIAS AMBIENTALES ATMOSFÉRICAS.

La Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México define una Contingencia Ambiental Atmosférica como “una situación eventual y transitoria declarada por las autoridades competentes cuando se presenta o prevé con base en análisis objetivos o en el monitoreo de la contaminación ambiental, una concentración de contaminantes o un riesgo ecológico derivado de actividades humanas o fenómenos naturales que afectan la salud de la población o al ambiente de acuerdo con las normas oficiales mexicanas” (51).

Cuando esto ocurre se realiza la activación del Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas, que contempla la aplicación de medidas restrictivas para disminuir los niveles de contaminación en la atmósfera por O₃, PM₁₀ y PM_{2.5}, así como medidas para disminuir o evitar los efectos adversos a la salud de la población (32,52).

Las acciones se llevan cabo mediante la activación de fases, las cuales consisten en una Fase Preventiva (Ver Tabla 3) y tres Fases de Contingencia Ambiental Atmosférica (Ver Tabla 4) (32).

Tabla 3. Activación y suspensión de la Fase Preventiva del Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas.

Contaminante	Activación	Suspensión
Ozono	Pronóstico de ozono para el día siguiente > 140 puntos con una probabilidad del 70% de ocurrencia. Indicador: concentración promedio horario.	De manera automática al día siguiente a las 19 h o con la emisión de un comunicado.
Partículas	> 135 puntos para PM ₁₀ . o > 135 puntos para PM _{2.5} . Indicador: concentración promedio móvil de 24 horas. Se declarará contingencia ambiental regional solo cuando se presente este valor por lo menos en una estación y en una de las cinco zonas en las que se divide la ZMVM.	< 135 puntos para PM ₁₀ . o < 135 puntos para PM _{2.5} . Indicador: concentración promedio móvil de 24 horas. Cuando las concentraciones sean < 135 puntos y se cuente con un pronóstico meteorológico favorable para el día siguiente y con la emisión de un comunicado.

Las unidades están en puntos del Índice de Calidad del Aire.

Tabla 4. Activación y suspensión de la Fase I, II y Combinada del Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas.

Contingencia	Activación			Suspensión		
	Índice (concentraciones)			Índice		
	Ozono	PM ₁₀	PM _{2.5}	Ozono	PM ₁₀	PM _{2.5}
	Promedio en una h	Promedio móvil 24 h	Promedio móvil 24 h	≤150 puntos con pronóstico meteorológico favorable para el día siguiente.		
Fase I	>150 puntos (>154 ppb)	>150 puntos (>214 µg/m ³)	>150 puntos (>97.4 µg/m ³)			
Fase II	>200 puntos (>204 ppb)	>200 puntos (>314 µg/m ³)	>200 puntos (>150.4 µg/m ³)			
Fase combinada	Ozono > 150 puntos y PM ₁₀ o PM _{2.5} > 140 puntos Ozono > 140 puntos y PM ₁₀ o PM _{2.5} > 150 puntos			≤ 150 puntos y ≤ 140 puntos dependiendo del contaminante, con pronóstico meteorológico favorable para el día siguiente.		

Tomada de Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 2019.

Contingencia Ambiental Atmosférica Extraordinaria en el Valle de México.

El 14 de mayo de 2019, la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME) activó la Contingencia Ambiental Atmosférica Extraordinaria en el Valle de México debido a una prevalencia de los índices de contaminación por partículas finas (53) producto de la ocurrencia de incendios en varios estados de la República. Al registrar una concentración de 105 µg/m³ en la estación Nezahualcóyotl (NEZ), la Secretaría de Salud de la Ciudad de México emitió una alerta sobre los riesgos asociados a las altas concentraciones de este contaminante, recomendando a la población acudir a recibir atención médica en caso de presentar infección en vías respiratorias, sintomatología en personas con comorbilidades respiratorias y cardiovasculares y ataques de asma en personas con esta patología (54). La contingencia fue suspendida el 17 de mayo del mismo año (55). Este fue considerado un hecho sin precedentes ya que los Programas para Contingencias Ambientales Atmosféricas de la ZMVM publicados en 2016 únicamente incluían al O₃ y a las PM₁₀, y no contemplaban a las PM_{2.5} (56), por lo que el 22 de mayo la CAME presentó un Nuevo

Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA) en donde se incluyeron a estos contaminantes (57).

IMPACTO DE LA PANDEMIA DE COVID-19 EN LA CALIDAD DE AIRE.

Durante el 2020 resultado de la aparición del SARS-CoV-2, el agente causante de la COVID-19, muchos gobiernos decidieron el cierre de actividades económicas, la restricción de la movilidad e interrupción de viajes internacionales, lo cual llevó a una reducción de las emisiones de contaminantes atmosféricos de origen antropogénico. Sin embargo, el 2020 también se caracterizó por la presencia de incendios forestales debido a condiciones inusualmente secas y calurosas, así como por una excepcional tormenta de arena proveniente del Sahara, resultando en niveles de $PM_{2.5}$ variables antes y durante el periodo de restricciones (58).

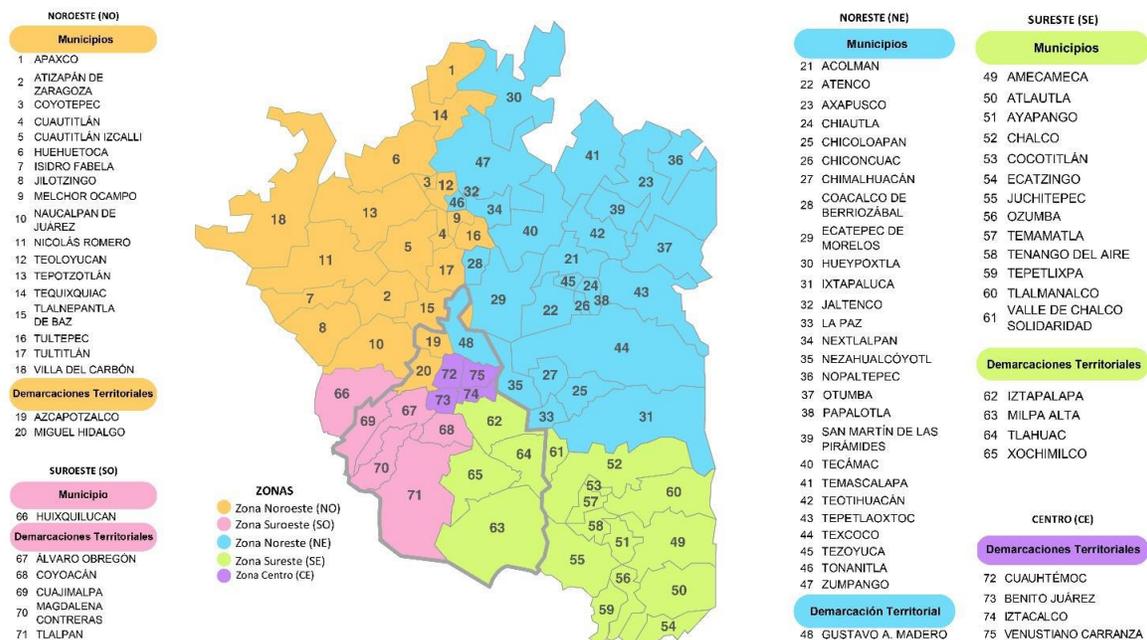
De acuerdo con un análisis realizado por Sokhi, las $PM_{2.5}$ mostraron una disminución de un 30% a un 40% en sus concentraciones medias durante el confinamiento total en 2020 en comparación con el mismo periodo en 2015-2019, aunque en algunas regiones se presentaron incrementos. En el caso de la Ciudad de México, las concentraciones se redujeron durante el cierre total (59).

MONITOREO ATMOSFÉRICO.

El Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA) consiste en una serie de programas informáticos que permiten recabar, transmitir y publicar información de la calidad del aire generada en las estaciones de monitoreo en las diversas entidades federativas que cuentan con la infraestructura adecuada para realizar la medición (60).

El Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) es el responsable de la medición continua de los contaminantes criterio y parámetros meteorológicos en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), a través de 44 estaciones de monitoreo, distribuidas en 16 alcaldías de la Ciudad de México y 12 municipios conurbados del Estado de México (61). Para la medición se divide a la ZMVM en cinco áreas geográficas: Centro, Noreste, Noroeste, Sureste y Suroeste (Ver Ilustración 4) (32).

Ilustración 4. Áreas geográficas de la ZMVM



Tomada de Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 2019

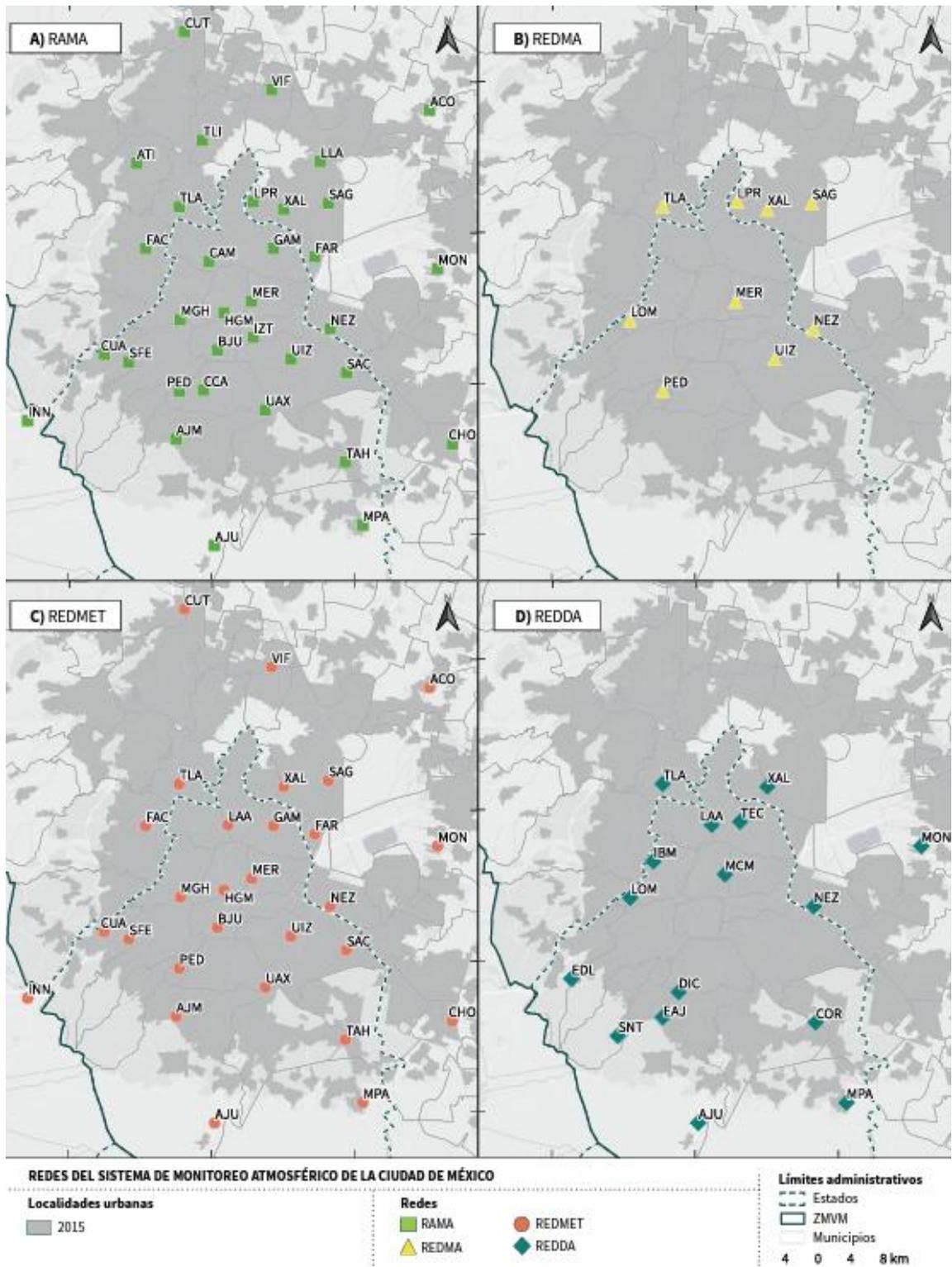
El SIMAT está conformado por cuatro subsistemas (Ver Ilustración 5). Es a través de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), mediante la cual se realiza la medición de los contaminantes criterio (SO_2 , NO_2 , O_3 , CO , PM_{10} y $PM_{2.5}$), a través de 34 estaciones de monitoreo.

La Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA), conformada por nueve estaciones, recolecta muestras de partículas suspendidas para su análisis gravimétrico y la determinación de metales pesados, esta red funciona de manera manual y el muestreo se realiza cada seis días.

Los otros dos subsistemas son la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET) que cuenta con 28 estaciones y realiza la medición de parámetros meteorológicos de temperatura, humedad, dirección y velocidad del viento, radiación solar y presión barométrica; y la Red de Depósito Atmosférico (REDDA) que cuenta con 16 estaciones y se encarga de recolectar muestras de polvo sedimentable y de lluvia, granizo, nieve y rocío (62).

Las condiciones mínimas para el establecimiento y operación de los sistemas de monitoreo de la calidad del aire se especifican en la Norma Oficial Mexicana “NOM-156-SEMARNAT-2021”, para una obtención confiable de la concentración de los contaminantes, las fuentes que los emiten y sus efectos, con el fin de guiar una adecuada toma de decisiones en materia de protección a la salud. Menciona que, para definir los contaminantes a muestrear y monitorear, y para ubicar cada estación es importante obtener información como un inventario de emisiones de la atmósfera, modelos de la calidad del aire, información meteorológica de la región, características geográficas locales e información fisiográfica urbana, localización de asentamientos humanos y estudios preliminares de la calidad del aire. Y será de acuerdo con los objetivos de muestreo y monitoreo la manera en que se seleccionarán los instrumentos o equipos de medición, se determinará la metodología a emplear, la escala de representatividad espacial de cada estación, el número de estaciones necesarias y la ubicación y el tipo de estación (63).

Ilustración 5. Ubicación de las estaciones de monitoreo del SIMAT.



Tomado de SEDEMA, SMAGEM, SEMARNATH y SEMARNAT, 2021.

COVID-19.

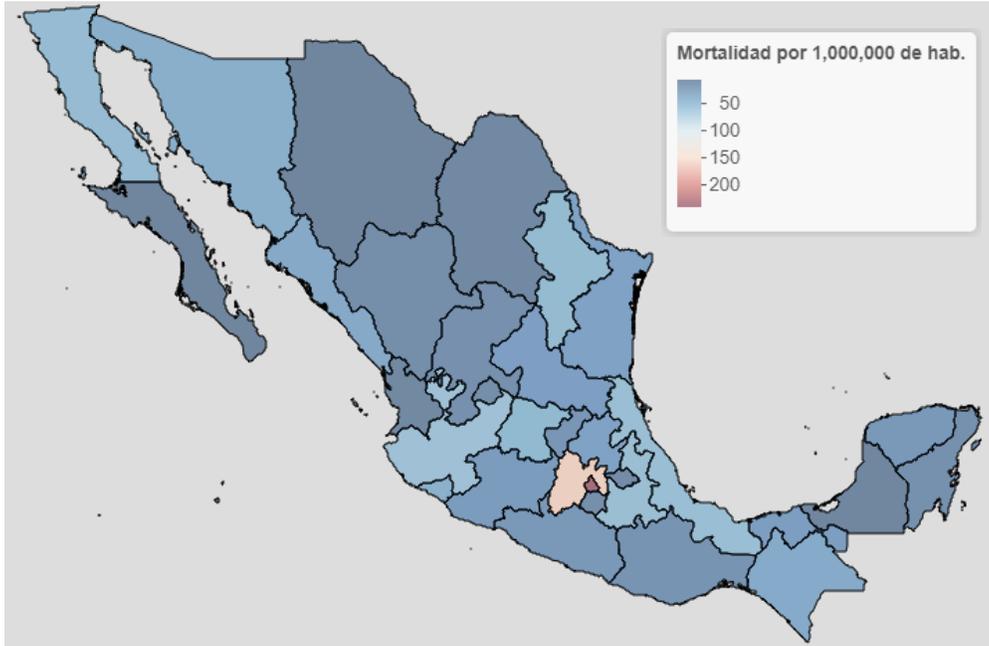
El origen de la COVID-19 se remonta a la identificación de un conglomerado de casos de neumonía atípica, relacionados con un mercado en Wuhan, China, en diciembre de 2019 (64). El 31 de diciembre la Organización Mundial de la Salud (OMS) fue notificada sobre estos casos, y el 9 de enero de 2020 China informó que el agente causante era un nuevo coronavirus, al que se le denominó de manera inicial 2019-nCoV. El 11 de enero la OMS recibió las secuencias genéticas del virus de la República Popular de China, y ese mismo día se notificó la primera defunción. Posteriormente el 30 de enero la OMS declaró a la enfermedad como una Emergencia de Salud Pública de Importancia Internacional (ESPII) y fue hasta el 11 de marzo que se declaró pandemia (65).

Situación en México.

El primer caso en México de la enfermedad ahora denominada COVID-19, se identificó el 27 de febrero de 2020 y el 18 de marzo de ese mismo año ocurrió la primera defunción. Después de declarada la transmisión local en el país el 23 de marzo, se inició la Jornada Nacional de Sana Distancia, y el 1° de abril se emitió la declaratoria de emergencia (66). Actualmente el virus se ha propagado por todo el territorio nacional, y se han presentado seis olas pandémicas. Al corte del 31 de diciembre de 2021 en México se registraron un total de 3,979,723 casos confirmados y 299,428 defunciones, representando una letalidad de 7.5%. Así como una tasa de incidencia acumulada de 3,086 por cada 100,000 habitantes y una tasa de mortalidad de 2,526 defunciones por millón de habitantes. A la misma fecha de corte las entidades con mayor número de defunciones acumuladas fueron la Ciudad de México y el Estado de México (Ver Ilustraciones 6 y 7) (Ver Gráficos 1 y 2). (67)

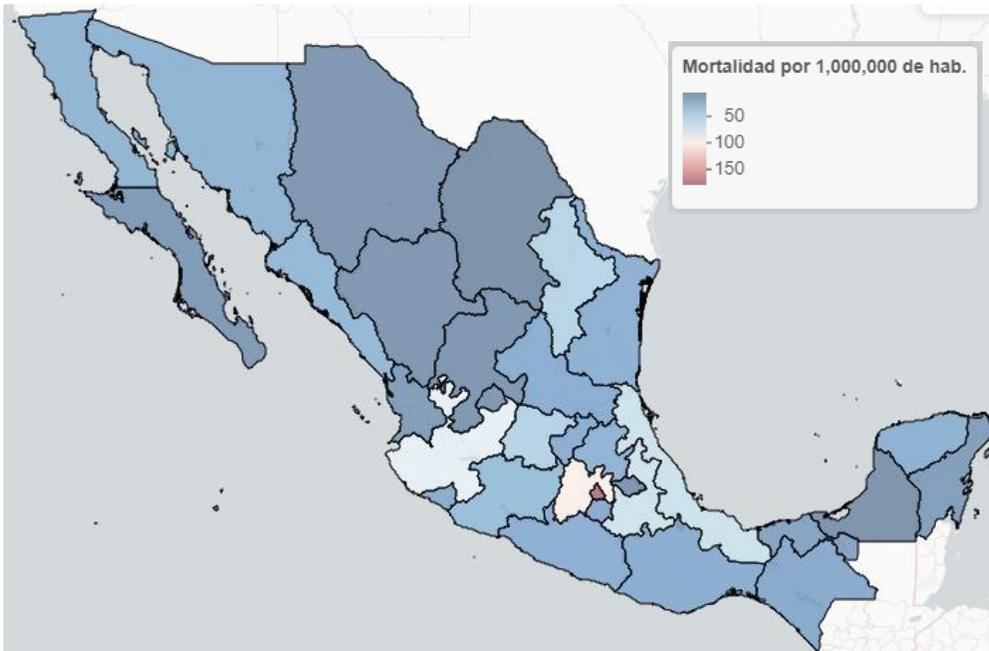
Por su parte, de acuerdo con el Grupo de trabajo interinstitucional para el análisis del exceso de mortalidad por todas las causas, el cual tiene como fin estimar las defunciones tanto directamente asociadas a la COVID-19, como por otras causas que de manera directa se pueden asociar a la situación general de la emergencia sanitaria, durante el periodo que comprende desde la S.E. 1 de 2020 a la S.E. 52 de 2021 el total de defunciones en exceso fueron 657,209, representando un porcentaje de exceso de mortalidad para todas las causas de 44.1% (68).

Mapa 1. Mortalidad ajustada por COVID-19 en México a nivel estatal durante 2020.



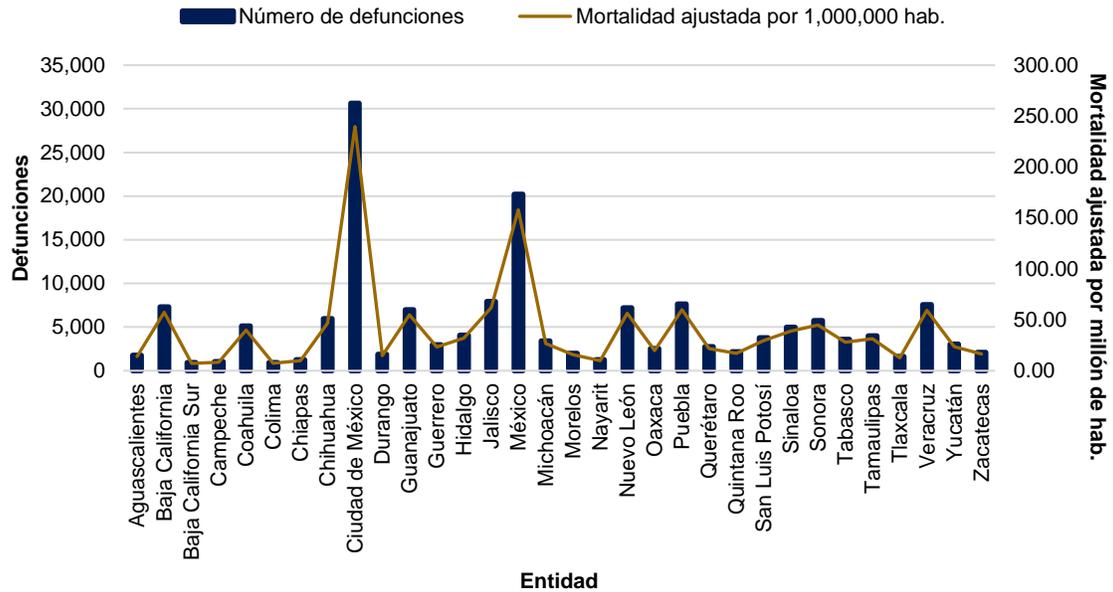
Creación propia con datos obtenidos de base de datos abiertos del Sistema de Vigilancia de Enfermedades Respiratorias y de las proyecciones de la población en México del Consejo Nacional de Población para 2020 (Anexo 1).

Mapa 2. Mortalidad ajustada por COVID-19 en México a nivel estatal durante 2021.



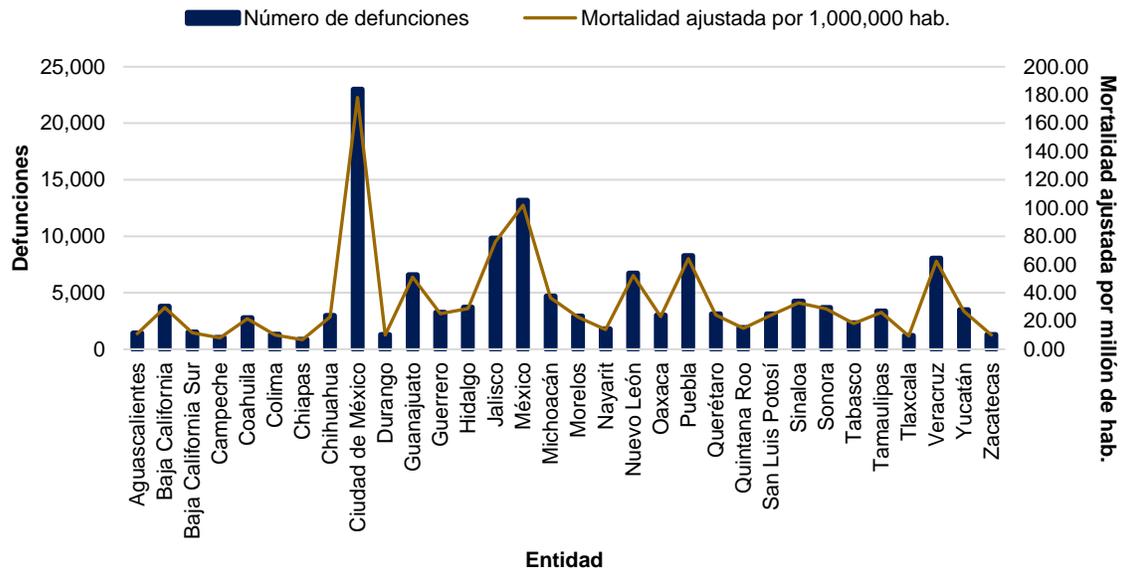
Creación propia con datos obtenidos de base de datos abiertos del Sistema de Vigilancia de Enfermedades Respiratorias y de las proyecciones de la población en México del Consejo Nacional de Población para 2021 (Anexo 2).

Gráfico 1. Mortalidad ajustada por COVID-19 en México a nivel estatal durante 2020 por millón de habitantes.



Creación propia con datos obtenidos de base de datos abiertos del Sistema de Vigilancia de Enfermedades Respiratorias y de las proyecciones de la población en México del Consejo Nacional de Población para 2020 (Anexo 1).

Gráfico 2. Mortalidad ajustada por COVID-19 en México a nivel estatal durante 2021 por millón de habitantes.



Creación propia con datos obtenidos de base de datos abiertos del Sistema de Vigilancia de Enfermedades Respiratorias y de las proyecciones de la población en México del Consejo Nacional de Población para 2021 (Anexo 2).

Virus SARS-CoV-2.

En relación con las características de este virus, pertenece a la familia *Coronaviridae*, y se trata de un virus envuelto, ARN monocatenario de sentido positivo, del género *Betacoronavirus* (64). Tiene una forma redonda u ovalada, con un diámetro de 60-140 nm (69). Contiene cuatro proteínas estructurales: espiga (S), envoltura (E), membrana (M) y nucleocápside (N); y otras 16 proteínas no estructurales. La proteína S presente en la membrana del virión, le da la apariencia de corona, ésta es la responsable de la unión, fusión y entrada del SARS-CoV-2 a las células huésped (14,64,69). Además, el SARS-CoV-2 depende del receptor de la enzima convertidora de angiotensina para ingresar a las células (69,70), característica que comparte con el SARS-CoV (14,64,70).

El SARS-CoV-2 se transmite a través de gotitas respiratorias (diámetro 5-10 μm), de aerosoles (<5 μm y >1 μm de diámetro), por contacto directo con fómites y vía fecal-oral. La propagación del virus puede ser asintomática y antes de presentar sintomatología (64).

Una vez que el virus ingresa a través del tracto respiratorio se une a células que expresan el receptor para la enzima convertidora de angiotensina-2 (ECA2), cuya expresión es mayor en las células ciliadas del epitelio nasal y en el epitelio bronquial superior, las cuales son los objetivos principales en la etapa temprana de la infección. En los pulmones, la expresión de ECA2 está limitada a las células alveolares de tipo II. Sin embargo, los niveles más altos de expresión de ECA2 se encuentran en el intestino delgado, los testículos, los riñones, el músculo cardíaco, el colon y la glándula tiroides (70). Posterior al proceso de unión, la envoltura viral se fusiona con la célula huésped y se libera su material genético para su traducción en el núcleo y formación de nuevas partículas virales (69).

La unión del virus al receptor para la ECA2 puede promover la replicación en el tracto respiratorio superior, promoviendo una transmisión más eficiente y aumentando la replicación en el tracto respiratorio inferior, así como de manera sistémica, causando una enfermedad más grave. Las citosinas inflamatorias liberadas en casos graves de COVID-19, como la interleucina-1 β (IL-1 β) y los interferones tipo I y tipo III, pueden regular al alza la expresión de ECA2, lo que podría establecer un ciclo de retroalimentación positiva para la replicación viral (70).

El cuadro clínico de la infección por SARS-CoV-2 tiene una gama de presentaciones, desde el cuadro asintomático, hasta el leve o moderado, y la enfermedad grave (69). La sintomatología más común incluye fiebre, tos, dificultad para respirar y dolor muscular.

También se puede presentar odinofagia, rinorrea, cefalea, conjuntivitis y anosmia. Los pacientes graves pueden desarrollar síndrome de dificultad respiratoria grave, sepsis, disfunción orgánica y finalmente la muerte (14).

Vigilancia Epidemiológica de la Enfermedad Respiratoria Viral en México.

La vigilancia epidemiológica de la enfermedad respiratoria viral en el país, que incluye a la COVID-19, se lleva a cabo a través de la vigilancia centinela, en 473 Unidades de Salud Monitoras de Enfermedad Respiratoria Viral (USMER), y la vigilancia en el resto de las unidades médicas no USMER (71).

Los casos que cumplen con la definición operacional de caso sospechoso, así como los resultados de las pruebas PCR-RT y antigénicas, son notificados a través de la plataforma SISVER (Sistema de Vigilancia Epidemiológica de Enfermedad Respiratoria Viral) que pertenece al Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica (SINAVE) de la Secretaría de Salud (Ver Tabla 3) (71).

Tabla 5. Definiciones operacionales para caso por Enfermedad Respiratoria Viral, marzo 2022.

Caso sospechoso de Enfermedad Respiratoria Viral
Persona de cualquier edad que en los últimos 10 días haya presentado al menos uno de los siguientes signos y síntomas: tos, disnea, fiebre o cefalea. Acompañados de al menos uno de los siguientes signos o síntomas: mialgias, artralgias, odinofagia, escalofríos, dolor torácico, rinorrea, polipnea, anosmia, disgeusia, conjuntivitis.
Caso confirmado por laboratorio
Persona que cumpla con la definición operacional de caso sospechoso y que cuente con diagnóstico confirmado por laboratorio.
Caso confirmado por prueba antigénica rápida para SARS-CoV-2
Persona que cumple con definición operacional de caso sospechoso y cuenta con una prueba antigénica rápida positiva para SARS-CoV-2 mediante un estuche comercial evaluado por el InDRE. La toma de muestra para prueba antigénica rápida debe realizarse únicamente durante los primeros siete días a partir del inicio de los síntomas. Las pruebas antigénicas rápidas no están indicadas en personas asintomáticas.
Caso confirmado por asociación epidemiológica
Persona que cumpla con definición operacional de caso sospechoso y que haya estado en contacto estrecho (convivencia a menos de un metro de distancia por 15 minutos o más continuos o acumulados) con un caso confirmado por laboratorio a PCR-RT o

prueba antigénica rápida para SARS-CoV-2, desde dos hasta 14 días antes del inicio de síntomas y que el caso confirmado al cual se encuentra asociado, se encuentre registrado en la plataforma del SISVER o en el Sistema de Notificación en Línea para la Vigilancia Epidemiológica (SINOLAVE).

Caso de Infección Respiratoria Aguda Grave (IRAG)

Toda persona que cumpla con la definición de caso sospechoso de Enfermedad Respiratoria Viral y con presencia de alguno de los siguientes datos de gravedad: disnea, dolor torácico o desaturación.

Tomado de Secretaría de Salud, 2022.

En caso de las defunciones, todas son notificadas al Sistema Epidemiológico y Estadístico (SEED) en la plataforma de Registro Electrónico de las Defunciones en Vigilancia Epidemiológica (REDVE) así como al SISVER, en un periodo no mayor a 48 horas posterior a la ocurrencia de la defunción o de la emisión del resultado de laboratorio (Ver Tabla 4) (71).

Tabla 6. Definiciones operacionales para defunción por Enfermedad Respiratoria Viral, marzo 2022.

Defunción con diagnóstico confirmado por laboratorio
Persona fallecida que cumpla con la definición operacional de caso sospechoso, que haya sido confirmado por laboratorio.
Defunción confirmada por asociación epidemiológica.
Persona fallecida que cumpla con la definición operacional de caso sospechoso, con resultado de muestra rechazada, no amplificada, no adecuada, no recibida o sin toma de muestra y que haya tenido contacto con un caso confirmado por laboratorio a PCR-RT o prueba antigénica rápida para SARS-CoV-2, durante los últimos 14 días previos a la fecha de inicio de síntomas y que el caso confirmado al cual se encuentra asociado esté registrado en la plataforma del SISVER.
Defunción confirmada por dictaminación clínica epidemiológica.
Persona fallecida que cumpla con la definición operacional de caso sospechoso, con resultado de muestra rechazada, no amplificada, no adecuada, no recibida o sin toma de muestra y que de acuerdo con los criterios clínicos epidemiológicos sea dictaminada como caso confirmado a COVID-19.

Tomado de Secretaría de Salud, 2022.

RELACIÓN ENTRE CONTAMINACIÓN DEL AIRE Y COVID-19.

Dentro de este marco, diversos estudios han analizado la relación entre la contaminación del aire y el riesgo de una mayor morbilidad y mortalidad por COVID-19 (13,15–17,72,73), ya que se ha observado que algunos de los países más afectados por la pandemia también han sido aquellos con una mala calidad del aire, como China, Italia y Nueva York (9,15,16).

Estudios han concluido que la incidencia y el riesgo de morbilidad y mortalidad por COVID-19 se incrementa con la exposición crónica y aguda a la contaminación del aire, particularmente a las partículas suspendidas (PM_{10} y $PM_{2.5}$) y al dióxido de azufre (SO_2) (15–17). Un estudio realizado en 25 ciudades mexicanas encontró que existe una asociación entre concentraciones de dióxido de nitrógeno (NO_2) y la tasa de mortalidad por COVID-19, de igual manera se encontró un incremento no significativo en la mortalidad por COVID-19 por unidad de incremento en la concentración de $PM_{2.5}$, contrario a los hallazgos de otros estudios en los cuales este incremento si ha resultado significativo. De acuerdo con Cabrera Cano et al., una posible explicación de la variación de estos resultados entre estudios es la composición de las partículas respirables, la cual puede variar de región a región, modificando sus efectos tóxicos (18).

Por su parte, Frontera propone que la exposición crónica a $PM_{2.5}$ provoca la sobreexpresión del receptor de la ECA2 alveolar, lo cual puede incrementar la carga viral en pacientes expuestos a la contaminación, agotando los receptores para la enzima, y deteriorando las defensas del huésped. Sumado a esto, el NO_2 atmosférico ocasiona un daño agregado a la lesión por la infección del SARS-CoV-2, lo cual puede contribuir al desarrollo de una forma grave de COVID-19. A esto lo denominó la hipótesis del doble impacto (72).

También se ha sugerido que las partículas PM pueden actuar como un vector para la transmisión de la COVID-19 (9,15,72), adhiriéndose el SARS-CoV-2 a las partículas, y que en condiciones de estabilidad atmosférica y altas concentraciones de PM pudiera incrementar su persistencia en la atmósfera (17).

Cabe resaltar que las partículas $PM_{2.5}$ y el SARS-CoV-2 cuentan con mecanismos fisiopatológicos comunes. El ingreso de ambos ocurre a través de las vías respiratorias hasta llegar a los pulmones, ambos ocasionan disfunción endotelial, estrés oxidativo, inflamación, trombosis y un incremento de las células inmunitarias (73). De acuerdo con diversas revisiones sistemáticas y metaanálisis, las comorbilidades presentes con mayor frecuencia en las defunciones por COVID-19 son la hipertensión y la diabetes mellitus; de

igual manera se han relacionado la enfermedad renal crónica y las enfermedades respiratorias crónicas con la mortalidad por esta enfermedad (74–79). Como ya se mencionó anteriormente, estos padecimientos también se observan relacionados con la exposición a altas concentraciones de $PM_{2.5}$, lo cual sugiere efectos aditivos o sinérgicos en el organismo (73,80).

En resumen, se cuenta con evidencia sobre los efectos negativos que tiene la exposición a contaminantes atmosféricos sobre la salud humana, incluso a bajas concentraciones. Desde el inicio de la pandemia de COVID-19 ha existido el interés por conocer el impacto de la contaminación del aire en las defunciones por esta enfermedad, y diversas investigaciones han demostrado una variabilidad en los resultados dependiendo del contaminante analizado y de la región de estudio; entre ellos varios autores han concluido que existe un incremento en la mortalidad por COVID-19 secundario a la exposición a la contaminación del aire. A pesar de estas conclusiones es importante remarcar que la mayoría de las investigaciones se realizaron en grandes ciudades de países desarrollados, que cuentan con una mejor medición de los contaminantes atmosféricos.

Otro punto importante a considerar es que el actual modelo económico, que se basa en "tomar-hacer-desechar", es responsable en gran parte del cambio climático y del agotamiento de los recursos naturales (81). Con el desarrollo económico predominantemente en las áreas urbanas, el progreso industrial y la mayor afluencia vehicular, los daños en el ambiente han incrementado hasta alcanzar un límite en el uso de los recursos, obteniendo como resultado, entre otros, una mayor emisión de contaminantes a la atmósfera (82). También es en las grandes ciudades donde se concentra una alta densidad poblacional que, derivado del estilo de vida sedentario, los malos hábitos higiénico-dietéticos y el estrés, una gran proporción de la población padece una o más comorbilidades, incrementando la carga por enfermedad, volviendo a la población más vulnerable a los efectos de los contaminantes. Aunado a esto, la normatividad vigente para una adecuada calidad del aire continúa siendo insuficiente para alcanzar los límites mínimos permitidos por la OMS.

La salud ambiental suele dejarse a un lado como un factor importante para la salud humana. Y la contaminación suele considerarse un costo externo, sólo si, un hombre o grupo poblacional puede demostrar su nexo causal de pérdida de bienestar por dicha contaminación (83).

Un enfoque que permite ampliar esta perspectiva sobre salud es el concepto de "Una Salud" (*One Health* en inglés), que engloba a la salud ambiental. Este enfoque es necesario para prevenir, detectar y responder de manera eficaz a los desafíos de salud que se originan de la relación entre humanos, animales y medio ambiente, y que gracias a la pandemia de COVID-19 ha cobrado mayor relevancia.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las defunciones por COVID-19 en México han tenido un gran impacto en la población mexicana. De acuerdo con información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) durante 2020 la COVID-19 se ubicó dentro de las tres primeras causas de defunción a nivel nacional (84).

Desde el inicio de la pandemia, las entidades con el mayor número de defunciones en el país corresponden a la Ciudad de México y el Estado de México, que forman parte de la ZMVM.

La Zona Metropolitana del Valle de México es considerada una de las regiones con peor calidad del aire en el país, debido al incumplimiento de las normas de salud ambiental de diversos contaminantes como el O_3 y el material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$), con concentraciones que exceden los límites permisibles la mayoría de los días del año (50).

Desde el inicio de la pandemia de COVID-19, estudios han encontrado asociación entre altos niveles de contaminación del aire y la tasa de mortalidad por esta enfermedad. Encontrado que, en regiones con altos niveles de contaminación, la mortalidad se duplicó en comparación con otras regiones (72).

Actualmente se ignora si el impacto por la contaminación del aire es igual para todos los países y regiones, ya que gran parte de los estudios se han realizado en países desarrollados.

Por lo tanto, se realiza la siguiente pregunta de investigación:

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál es la asociación entre los registros de mortalidad por COVID-19 y las concentraciones de $PM_{2.5}$ en la Zona Metropolitana del Valle de México durante el periodo 2020 a 2021?

JUSTIFICACIÓN

La evaluación cuantitativa de la calidad del aire, mediante la medición de la concentración de los contaminantes permite estimar la asociación entre los resultados adversos para la salud y las exposiciones a corto plazo a dichos contaminantes. Actualmente existe un vacío en la evidencia respecto a la asociación de esta con la mortalidad por COVID-19, en países y regiones con diferentes condiciones socioeconómicas y ambientales, como México. Contar con información precisa de las posibles muertes atribuidas a la contaminación del aire, permitirá generar evidencia, ya que este tipo de estudios epidemiológicos son de utilidad para realizar evaluaciones de impacto en la salud en todo el mundo (85).

Conocer la calidad del aire de las ciudades es útil en la toma de decisiones tanto para el público en general como para las autoridades sanitarias y ambientales, por lo que determinar esta relación permitirá dar pie a la formulación de nuevas políticas públicas y a la implementación de otras medidas no farmacológicas durante eventos como pandemias o durante temporadas con incremento de casos de infecciones respiratorias agudas, como la disminución de la movilidad, el establecimiento de valores límite permisibles de concentración de partículas suspendidas $PM_{2.5}$ más estrictos, así como acciones preventivas para grupos vulnerables, como el *home office* para adultos mayores, personas con comorbilidades, menores de edad y mujeres embarazadas, con el fin último de disminuir la morbilidad y mortalidad, y así disminuir el gasto en salud.

De igual manera, realizar este estudio permitirá visibilizar la necesidad de contar con un adecuado sistema de monitoreo de la calidad del aire en todas las entidades y zonas metropolitanas del país. Ya que, a pesar de contar con información de 24 Sistemas de Monitoreo de la Calidad del Aire, distribuidos en 20 entidades, que en total incluyen 185 estaciones de monitoreo, solo 114 estaciones son capaces de medir $PM_{2.5}$; y de las 53 ciudades y zonas metropolitanas con capacidad de realizar su medición, en 25 no se cumplió con los límites normados durante el año 2019 (50). Por consiguiente, se desconocen los datos reales de la calidad del aire y del impacto en la salud de la población.

Así mismo, de acuerdo con la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible, que cuenta con 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), contar con este tipo de información permitirá llevar una adecuada medición y análisis de los indicadores para las metas: 3.9 Reducir considerablemente el número de muertes y enfermedades causadas por productos químicos peligrosos y por la polución y contaminación del aire, agua y suelo; 7.1 Garantizar

el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos; y 11.6 Reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo; que a su vez incluyen los indicadores 3.9.1: Tasa de mortalidad atribuida a la contaminación de los hogares y del aire ambiente, 7.1.2: Proporción de la población cuya fuente primaria de energía son los combustibles y tecnologías limpias y 11.6.2 Niveles medios anuales de partículas finas en suspensión (por ejemplo, $PM_{2.5}$ y PM_{10}) en las ciudades (ponderados según la población), respectivamente (86).

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL.

- Determinar la relación entre la mortalidad por COVID-19 y las concentraciones de $PM_{2.5}$ en la Zona Metropolitana del Valle de México durante el periodo del 1° de marzo del 2020 al 31 de diciembre de 2021.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

1. Caracterizar epidemiológicamente las defunciones por COVID-19 por sexo, edad, presencia de comorbilidades, municipio de residencia, y zona geográfica de la ZMVM durante el periodo de 2020 y 2021.
2. Caracterizar la distribución espaciotemporal de las defunciones por COVID-19 a escala municipal y de zonas geográficas de la ZMVM durante el periodo 2020 a 2021.
3. Describir las concentraciones de $PM_{2.5}$ en la ZMVM durante el periodo de 2020 y 2021, a través de una serie de tiempo.
4. Determinar la asociación entre las defunciones por COVID-19 y las concentraciones de $PM_{2.5}$ por zonas geográficas de la ZMVM durante el periodo de estudio.

HIPÓTESIS

La contaminación del aire por $PM_{2.5}$ puede representar un componente que se encuentre asociado con el incremento en la mortalidad por COVID-19 en la Zona Metropolitana del Valle de México, durante el periodo 2020 a 2021.

MÉTODOS

TIPO Y DISEÑO DE ESTUDIO.

Se realizó un estudio tipo ecológico, retrospectivo, de fuente de datos secundarios, de series de tiempo, en el cual se investigó si parte de la variación a corto plazo en las defunciones por COVID-19 puede explicarse por cambios en la exposición a concentraciones de PM_{2.5} durante el periodo de 1° de marzo de 2020 al 31 de diciembre de 2021 mediante un modelo de regresión tipo Poisson múltiple.

FUENTES DE DATOS.

La recolección de los datos se realizó a través de fuentes secundarias de información de acceso público, por lo que no se hizo uso de instrumentos de medición:

- Los datos de mortalidad se obtuvieron de la base de datos abiertos del Sistema de Vigilancia de Enfermedades Respiratorias (SISVER) del Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica (SINAVE) de la Dirección General de Epidemiología (DGE).
- Las concentraciones diarias de PM_{2.5} se obtuvieron de la base de datos pública de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) de la Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire.
- Los parámetros meteorológicos se obtuvieron de la base de datos pública de la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET) del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) de la Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire.

UNIVERSO DE ESTUDIO.

Unidad de análisis y observación.

Defunciones por COVID-19 en la población de la ZMVM.

Selección y tamaño de la muestra.

Criterios de inclusión.

Se incluyeron todas las defunciones registradas en el SISVER con diagnóstico de COVID-19 confirmado por laboratorio, por asociación epidemiológica y dictaminación clínica epidemiológica, que hayan ocurrido en sujetos con residencia en los municipios que pertenecen a la ZMVM durante el 2020 al 2021.

Se seleccionaron todos los municipios que pertenecen a la ZMVM y que pertenecen a la Ciudad de México y Estado de México.

Se incluyeron todas las estaciones de monitoreo que cuenten con registros de las concentraciones de $PM_{2.5}$ durante el periodo de 2020 a 2021.

Se incluyeron las concentraciones de $PM_{2.5}$ de los días que cumplieron con un mínimo de 18 registros en 24 horas, es decir, el 75% de las concentraciones horarias válidas, con el fin de asegurar la representatividad de las concentraciones.

Criterios de exclusión.

Se excluyeron las defunciones que no contaron con entidad o municipio de residencia o que presentaron discrepancias entre la entidad de residencia y el municipio de residencia.

Se excluyeron las estaciones de monitoreo que no contaron con registros completos durante el periodo de 2020 a 2021.

Criterios de eliminación.

No aplican.

DEFINICIÓN DE VARIABLES.

Variable dependiente: defunciones diarias por COVID-19 en la ZMVM.

Variable independiente: concentraciones de PM_{2.5} en la ZMVM.

OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.

Nombre	Definición operacional	Tipo	Escala	Unidad de Medida	Fuente
Defunciones por COVID-19	Número de defunciones por COVID-19 confirmado por laboratorio, por asociación epidemiológica y dictaminación clínica epidemiológica	Dependiente	Cuantitativa discreta	Número de defunciones por COVID-19	Datos abiertos SISVER
Concentración diaria promedio de PM_{2.5}	Promedio de 24 horas de la concentración de partículas con un diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 µm	Independiente	Cuantitativa continua	Microgramos por metro cúbico	SIMAT
Lugar de residencia	Municipio de residencia	Análisis descriptivo	Cualitativa nominal politómica	Codificación numérica	Datos abiertos SISVER
Edad	Tiempo en años transcurrido desde el nacimiento hasta la muerte	Análisis descriptivo	Cuantitativa discreta	Codificación numérica	Datos abiertos SISVER
Grupo de Edad	Tiempo en años transcurrido desde el nacimiento hasta la muerte (quinquenos)	Análisis descriptivo	Cualitativa ordinal	Codificación numérica	Datos abiertos SISVER
Sexo	Características biológicas que definen a los seres humanos como hombre o mujer	Análisis descriptivo	Cualitativa categórica	Codificación numérica	Datos abiertos SISVER
Diabetes Mellitus	Defunción registrada con diagnóstico de diabetes mellitus	Análisis descriptivo	Cualitativa categórica	Codificación numérica	Datos abiertos SISVER
EPOC	Defunción registrada con diagnóstico de enfermedad pulmonar obstructiva crónica	Análisis descriptivo	Cualitativa categórica	Codificación numérica	Datos abiertos SISVER
Asma	Defunción registrada con diagnóstico de asma	Análisis descriptivo	Cualitativa categórica	Codificación numérica	Datos abiertos SISVER
Hipertensión	Defunción registrada con diagnóstico de hipertensión	Análisis descriptivo	Cualitativa categórica	Codificación numérica	Datos abiertos SISVER

Nombre	Definición operacional	Tipo	Escala	Unidad de Medida	Fuente
Enfermedad Cardiovascular	Defunción registrada con diagnóstico de enfermedad cardiovascular	Análisis descriptivo	Cualitativa categórica	Codificación numérica	Datos abiertos SISVER
Obesidad	Defunción registrada con diagnóstico de obesidad	Análisis descriptivo	Cualitativa categórica	Codificación numérica	Datos abiertos SISVER
Temperatura	Promedio de las temperaturas registradas durante 24 horas	Confusora	Cuantitativa continua	Grados Celsius	SIMAT
Humedad relativa	Porcentaje de saturación del aire con vapor de agua	Confusora	Cuantitativa continua	Porcentaje	SIMAT
Velocidad del viento	Velocidad en que se desplaza el aire que fluye	Confusora	Cuantitativa continua	Metros por segundo	SIMAT
Zonas geográficas de la ZMVM	Cinco zonas separadas por cuatro grandes vialidades que la atraviesan de norte a sur, de este a oeste y al centro; donde se encuentran ubicadas las estaciones de monitoreo y donde ocurrieron las defunciones	Confusora	Cualitativa nominal politómica	Codificación numérica	Datos abiertos SISVER, SIMAT

PLAN DE ANÁLISIS.

Se calcularon las medidas de frecuencia y tendencia central para las defunciones de acuerdo con el sexo, edad, presencia de comorbilidades, municipio de residencia, y zona geográfica de la ZMVM.

Se describieron las concentraciones de $PM_{2.5}$ para cada estación de monitoreo y la región geográfica a la que pertenece, por cada año de estudio.

Se realizó un modelo de regresión tipo Poisson múltiple para identificar la estimación entre el incremento de una unidad de medida de la contaminación por $PM_{2.5}$ y la mortalidad por COVID-19, ajustando por variables meteorológicas. Se eligió este modelo ya que es de referencia en estudios de variables de recuento, además, la distribución de Poisson se utiliza para encontrar la probabilidad de que ocurran eventos dentro de un intervalo de tiempo dado. La ventaja del modelo de regresión Poisson es que tiene en cuenta la naturaleza discreta de los datos de conteo y puede manejar situaciones donde los datos no siguen una distribución normal.

La interpretación de la información se realizó agrupando de acuerdo con las cinco zonas en las que se divide geográficamente a la ZMVM: zona Centro, Noroeste, Noreste, Suroeste y Sureste, dentro de las cuales se ubican las unidades de monitoreo atmosférico.

La limpieza de datos y el análisis se llevó a cabo con el software RStudio para lenguaje de programación R.

RESULTADOS.

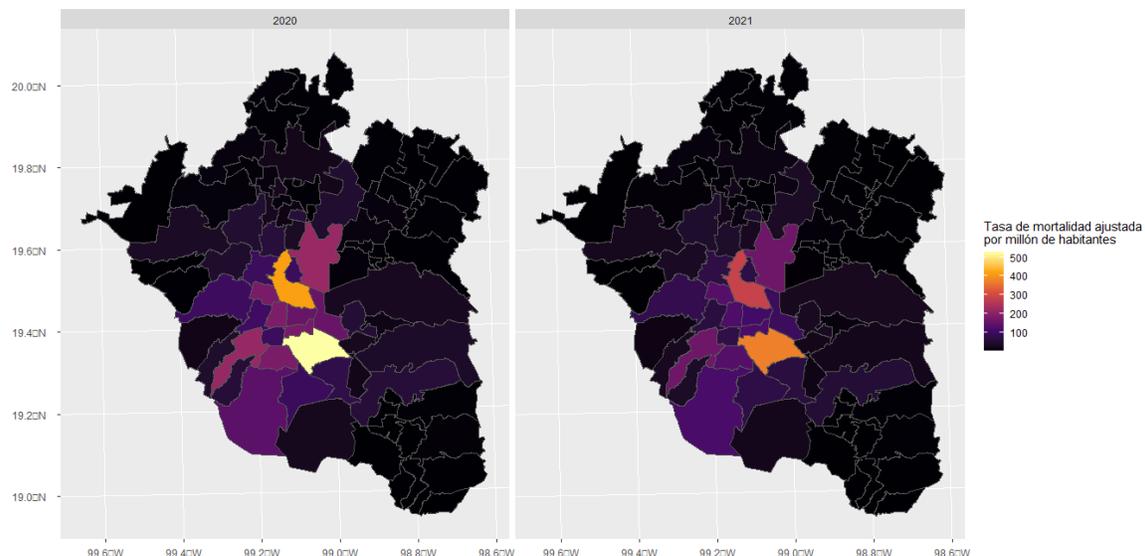
Se analizaron un total de 77,466 registros de defunciones confirmadas por COVID-19 mediante asociación clínica epidemiológica, por comité de dictaminación y muestra de laboratorio o prueba antigénica, para el periodo del 18 de marzo de 2020 al 31 de diciembre de 2021, en 75 municipios de la ZMVM (16 demarcaciones territoriales de la Ciudad de México y 59 municipios del Estado de México).

Para las concentraciones diarias promedio de $PM_{2.5}$ se analizaron 15,134 registros para el periodo de 1 de enero de 2019 al 31 de diciembre de 2021, en 22 estaciones de monitoreo distribuidas en 17 municipios de la ZMVM.

DEFUNCIONES POR COVID-19 EN LA ZMVM.

Se calcularon las tasas de mortalidad cruda y ajustada por municipio de la ZMVM para 2020 como para 2021. Durante 2020 Iztapalapa fue el municipio con la mayor tasa de mortalidad con 528.46 defunciones por 1,000,000 hab., seguido de Gustavo A. Madero con 416.58 defunciones por 1,000,000 hab. y en tercer lugar Ecatepec de Morelos con 218.85 defunciones por 1,000,000 hab. Durante 2021 Iztapalapa también se posicionó como el municipio con la mayor tasa de mortalidad con 372.84 defunciones por 1,000,000 hab., seguido de Gustavo A. Madero (282.44 defunciones por 1,000,000 hab.) y Álvaro Obregón (160.82 defunciones por 1,000,000 hab.) (Ver Mapa 3 y 4, Anexos 3 y 4).

Mapa 3. Mortalidad ajustada por COVID-19 en la ZMVM a nivel municipal durante 2020 y 2021.



Mapa 4. Mortalidad ajustada por COVID-19 en la ZMVM, por zona y a nivel municipal durante 2020 y 2021.



Creación propia con datos obtenidos de base de datos abiertos del INEGI y del SISVER.

La mediana de edad durante el periodo estudiado fue de 63 años, con una DE de 14.31, el 63.8 % (49,434) correspondió al sexo masculino y el 36.2 % (28,032) al sexo femenino.

En relación con la presencia de comorbilidades el 37.3 % (28,891) padecía hipertensión, el 31.8 % (24,607) padecía diabetes mellitus, el 17.8 % (13,810) padecía obesidad, mientras que otras patologías (enfermedad renal crónica, enfermedad cardiovascular, enfermedad pulmonar obstructiva crónica y asma) se reportaron con menor frecuencia. En la Tabla 7 se muestra la distribución por sexo y comorbilidades de las defunciones.

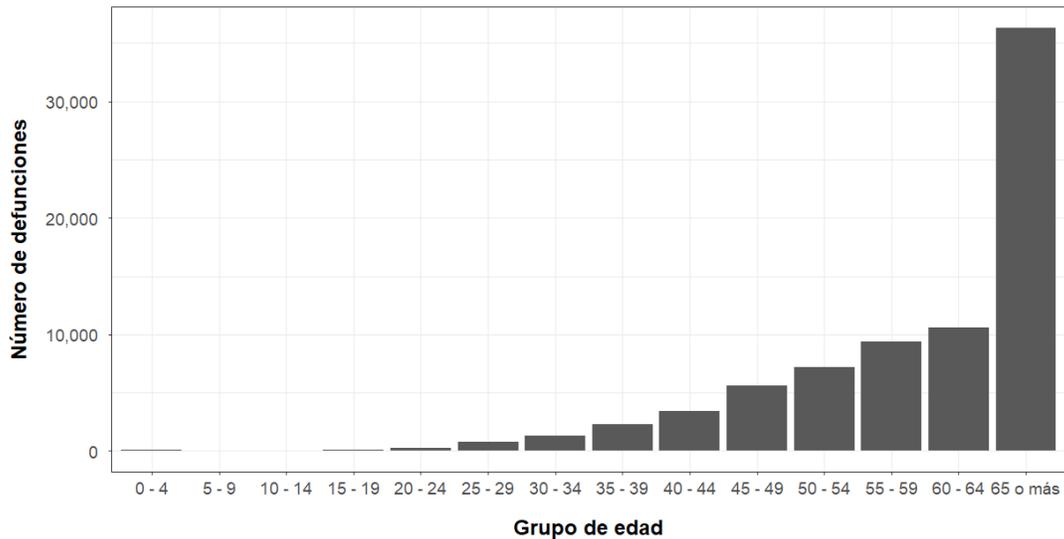
Tabla 7. Distribución de las defunciones de acuerdo con su sexo y la presencia de comorbilidades, en la ZMVM durante 2020 y 2021.

Variable	n	%
Sexo		
Hombre	49,434	63.8%
Mujer	28,032	36.2%
Comorbilidades		
Hipertensión	28,891	37.3%
Diabetes	24,607	31.8%
Obesidad	13,810	17.8%
Enfermedad Renal Crónica	4,428	5.7%
Enfermedad Cardiovascular	3,024	3.9%
EPOC	2,939	3.8%
Asma	881	1.1%
Total	77,466	100 %

Creación propia con datos obtenidos del Sistema de Vigilancia de Enfermedades Respiratorias

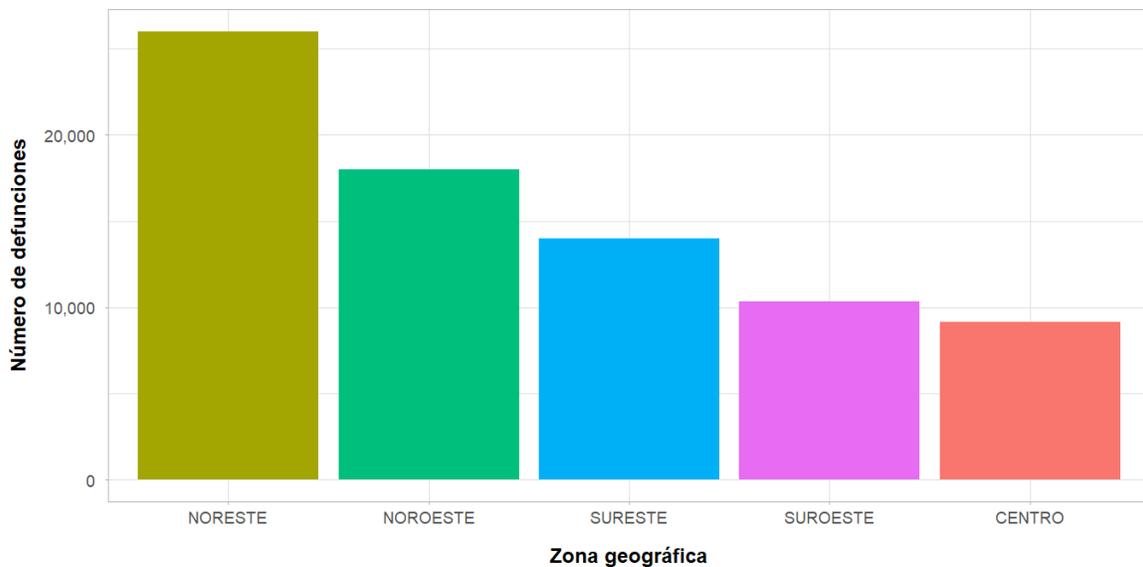
En los Gráficos 3, 4, 5 y 6 se muestra la distribución de las defunciones por grupo de edad, por zona geográfica de la ZMVM, por sexo y comorbilidades. La zona Noreste concentró el mayor número de defunciones, seguida de la zona Noroeste y de la zona Sureste; la distribución por sexo y grupo de edad se mantuvieron igual para las cinco zonas.

Gráfico 3. Defunciones por COVID-19 por zona geográfica de la ZMVM durante el 2020 y 2021.



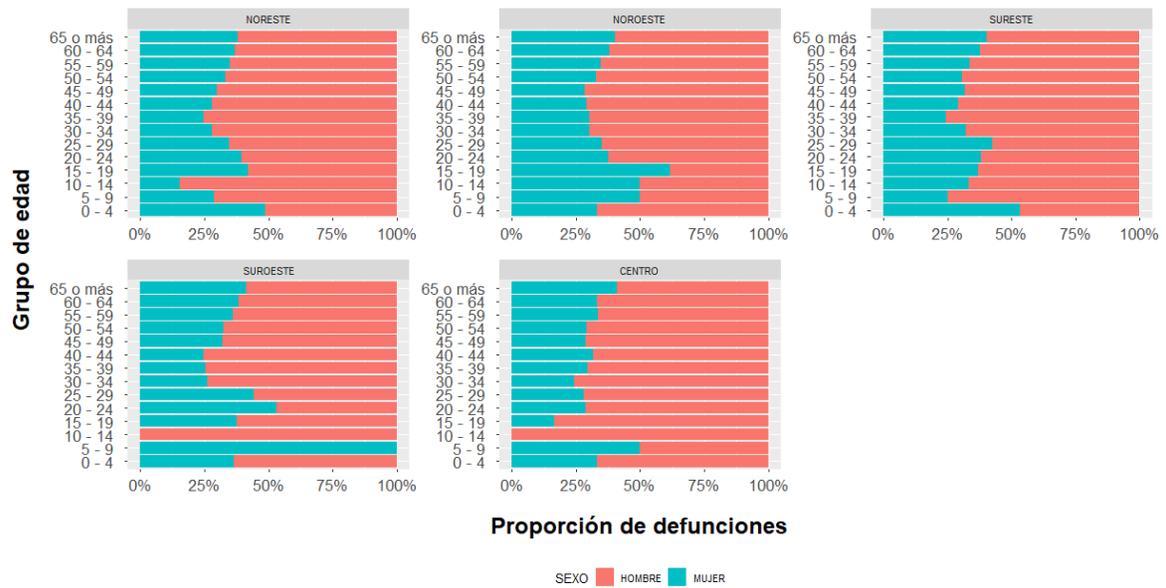
Creación propia con datos obtenidos de base de datos abiertos del Sistema de Vigilancia de Enfermedades Respiratorias.

Gráfico 4. Defunciones por COVID-19 por zona geográfica de la ZMVM durante el 2020 y 2021.



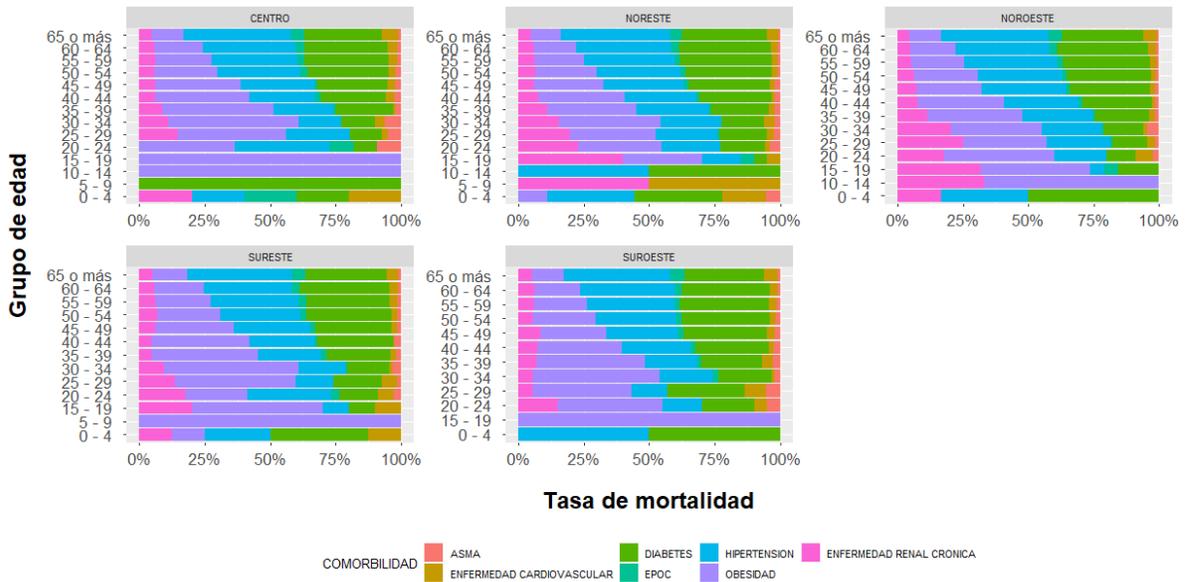
Creación propia con datos obtenidos de base de datos abiertos del Sistema de Vigilancia de Enfermedades Respiratorias.

Gráfico 5. Defunciones por COVID-19 por sexo, grupo de edad y zona geográfica de la ZMVM, durante el 2020 y 2021.



Creación propia con datos obtenidos de base de datos abiertos del Sistema de Vigilancia de Enfermedades Respiratorias.

Gráfico 6. Tasa de mortalidad por COVID-19 por grupo de edad, comorbilidad y zona geográfica de la ZMVM, durante el 2020 y 2021.



Creación propia con datos obtenidos de base de datos abiertos del Sistema de Vigilancia de Enfermedades Respiratorias.

CONCENTRACIONES DE PM_{2.5} EN LA ZMVM.

En el año 2019 la mediana de concentración promedio fue de 22.78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con una concentración máxima de 132 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación Nezahualcóyotl (NEZ), Estado de México en la zona Noreste (Ver Gráfico 7). De los 5,146 registros durante ese año, en 181 (3.39 %) se sobrepasó el límite máximo permitido (45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) de 24 horas, de acuerdo con la NOM vigente para ese año. Durante ese año, se sobrepasó el límite máximo permitido (45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) de 24 horas el 10.14 % (37) de los días, de acuerdo con la NOM vigente para ese año, predominando en la zona Noreste (Ver Tabla 8). Se presentaron dos contingencias ambientales atmosféricas por PM_{2.5}, una el 14 de mayo y otra el 25 de diciembre.

En el año 2020 la mediana de concentración promedio fue de 19.09 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con una concentración máxima de 63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación UAM Iztapalapa (UIZ), Ciudad de México en la zona Sureste (Ver Gráfico 7). De los 4,925 registros durante ese año, en 34 (0.69 %) se sobrepasó el límite máximo permitido (45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) de 24 horas, de acuerdo con la NOM vigente para ese año. Durante ese año, se sobrepasó el límite máximo permitido (45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) de 24 horas el 4.1 % (15) de los días, de acuerdo con la NOM vigente para ese año, predominando en la zona Sureste (Ver Tabla 8). No se presentaron contingencias ambientales atmosféricas por PM_{2.5}.

En el año 2021 la mediana de concentración promedio fue de 19.34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con una concentración máxima de 103 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación Santiago Acahualtepec (SAC), Ciudad de México en la zona Sureste (Ver Gráfico 7). De los 4,882 registros durante ese año, en 51 (1.04 %) se sobrepasó el límite máximo permitido (45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) de 24 horas, de acuerdo con la NOM vigente para ese año. Durante ese año, se sobrepasó el límite máximo permitido (45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) de 24 horas el 5.21 % (19) de los días, de acuerdo con la NOM vigente para ese año, predominando en la zona Sureste (Ver Tabla 8). Se presentó una contingencia ambiental atmosférica por PM_{2.5} el 25 de diciembre.

Gráfico 7. Concentraciones promedio en 24 h de PM_{2.5} por estación, por zona de la ZMVM durante 2019 a 2021.

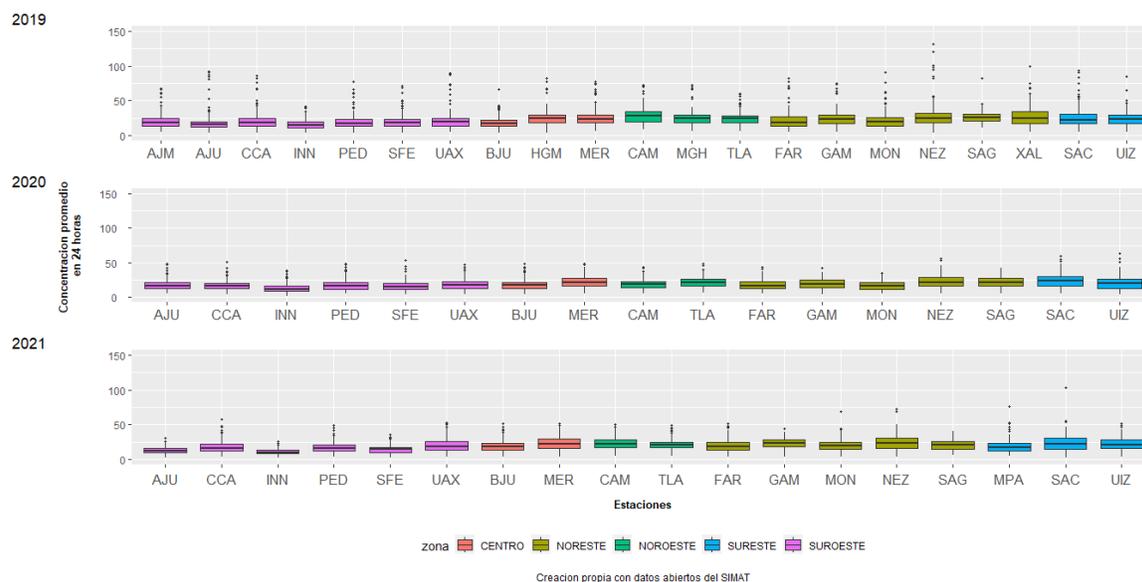


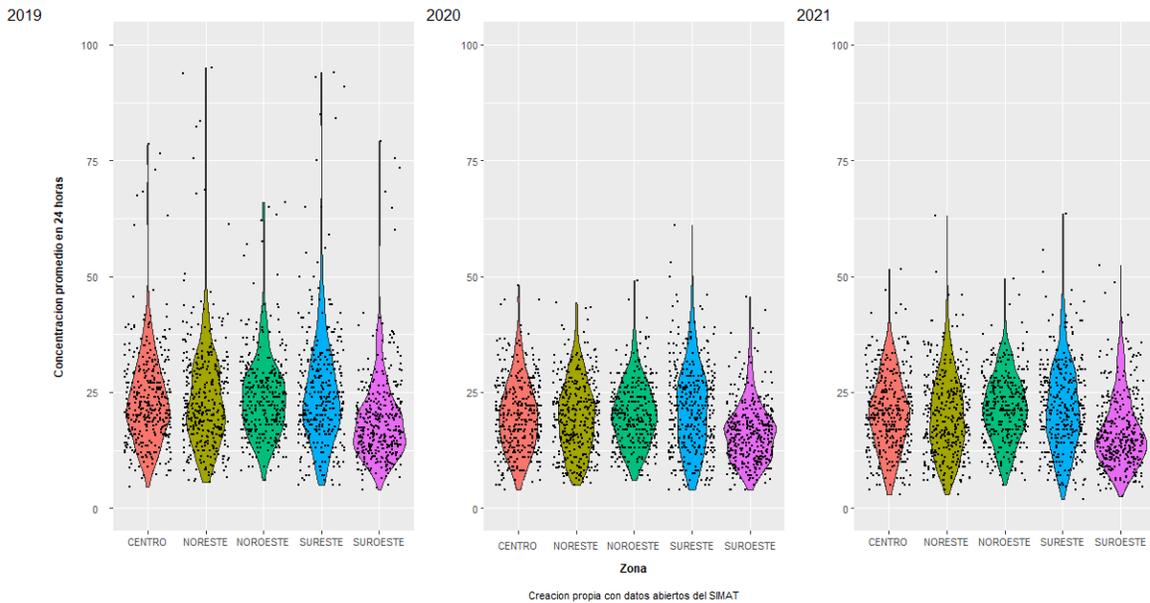
Tabla 8. Número de días en el que se sobrepasó el límite máximo permitido de concentraciones de PM_{2.5} (45 µg/m³) de 24 horas, por año y por zona de la ZMVM.

Zona	No. Días	%
2019		
Centro	10	27.03%
Noroeste	16	43.24%
Noreste	28	75.68%
Suroeste	16	43.24%
Sureste	22	59.46%
Total	37	100%
2020		
Centro	3	20.00%
Noroeste	2	13.33%
Noreste	7	46.67%
Suroeste	5	33.33%
Sureste	10	66.67%
Total	15	100%
2021		
Centro	5	26.32%
Noroeste	2	10.53%
Noreste	10	52.63%
Suroeste	4	21.05%
Sureste	14	73.68%
Total	19	100%

Creación propia con datos obtenidos del SIMAT.

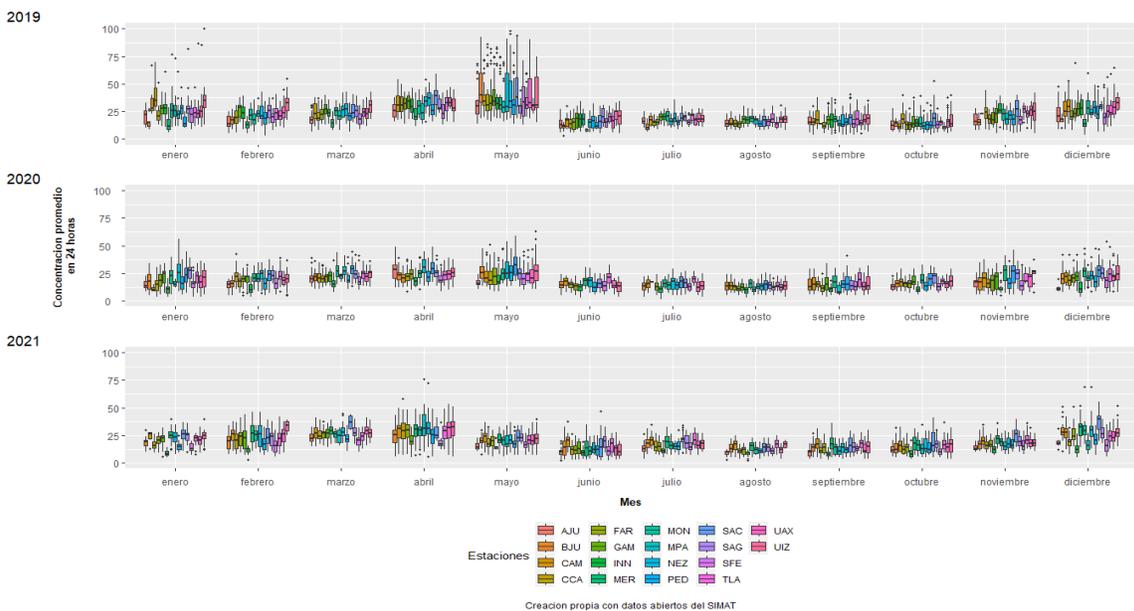
En el Gráfico 8 se muestran las concentraciones promedio de PM_{2.5} por zona de la ZMVM durante 2019, 2020 y 2021.

Gráfico 8. Concentraciones promedio en 24 h de PM_{2.5} por zona de la ZMVM durante 2019 a 2021.



Durante el periodo estudiado se observó que el mes de abril y mayo presentaron las concentraciones más altas, con una tendencia a la disminución y una posterior elevación a partir del mes de noviembre (Ver Gráfico 9).

Gráfico 9. Concentraciones promedio en 24 h de PM_{2.5} de la ZMVM por estación, mes y año durante el periodo 2019 a 2021.



Se calcularon los promedios móviles para las defunciones por COVID-19 por fecha de defunción y por fecha de inicio de síntomas; posteriormente se creó una serie de tiempo junto con las concentraciones de PM_{2.5} promediadas en 24 horas, por zona geográfica de la ZMVM para comparar visualmente el comportamiento de ambas variables (Ver Gráficos 10 a 15).

Gráfico 10. Promedios móviles de defunciones por fecha de defunción y fecha de inicio de síntomas y promedios en 24 h de PM_{2.5} en la ZMVM.

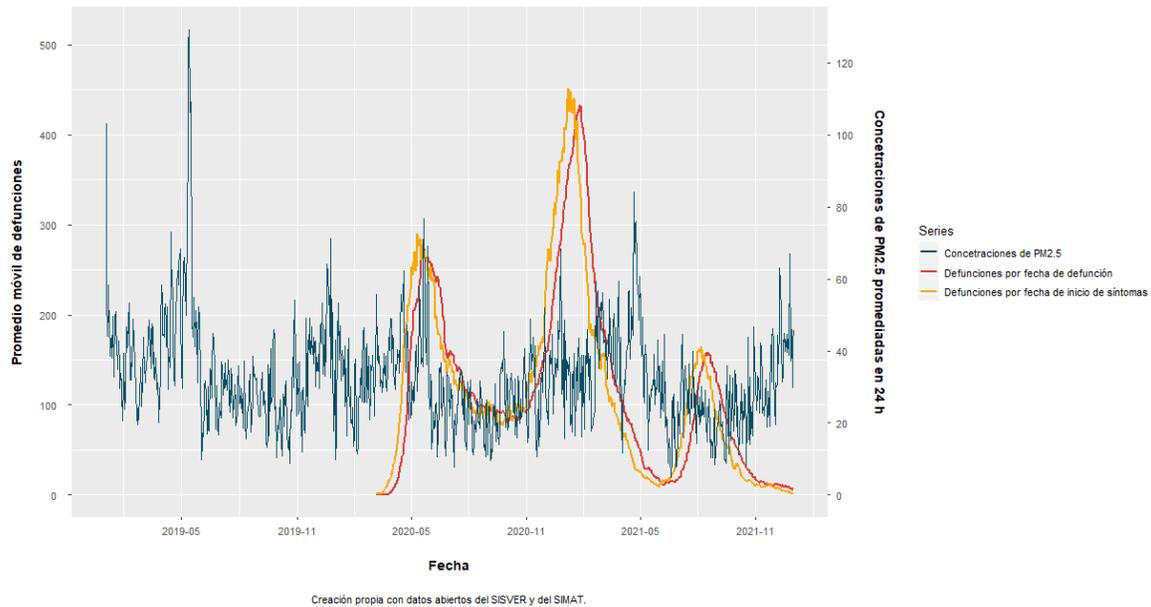


Gráfico 11. Promedios móviles de defunciones por fecha de defunción y fecha de inicio de síntomas y promedios en 24 h de PM_{2.5} en la Zona Centro de la ZMVM.

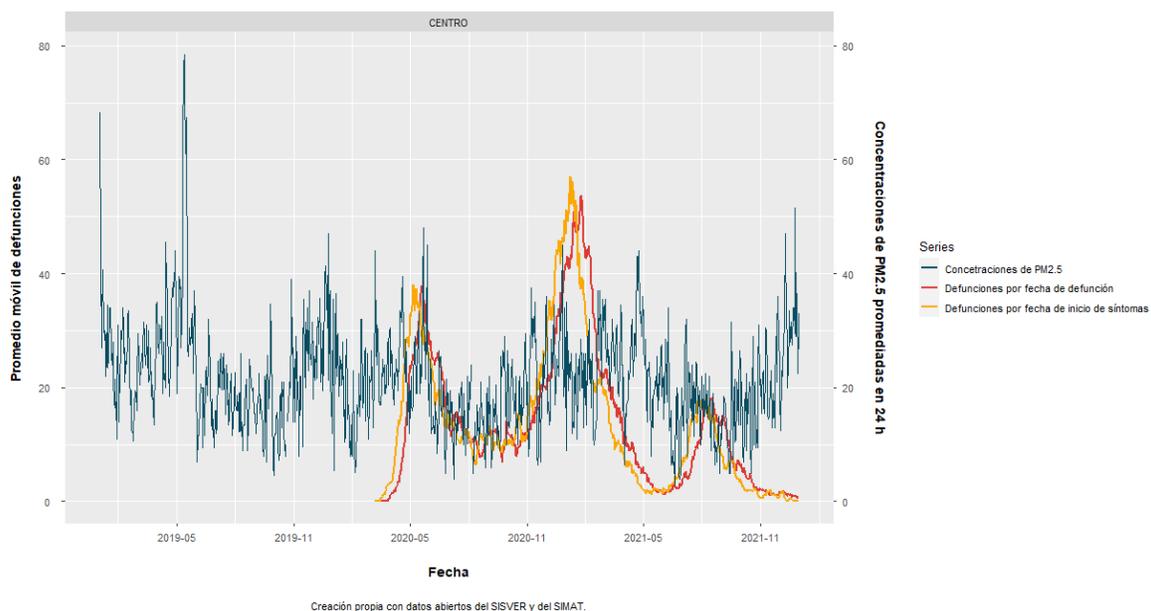


Gráfico 12. Promedios móviles de defunciones por fecha de defunción y fecha de inicio de síntomas y promedios en 24 h de PM_{2.5} en la Zona Noroeste de la ZMVM.

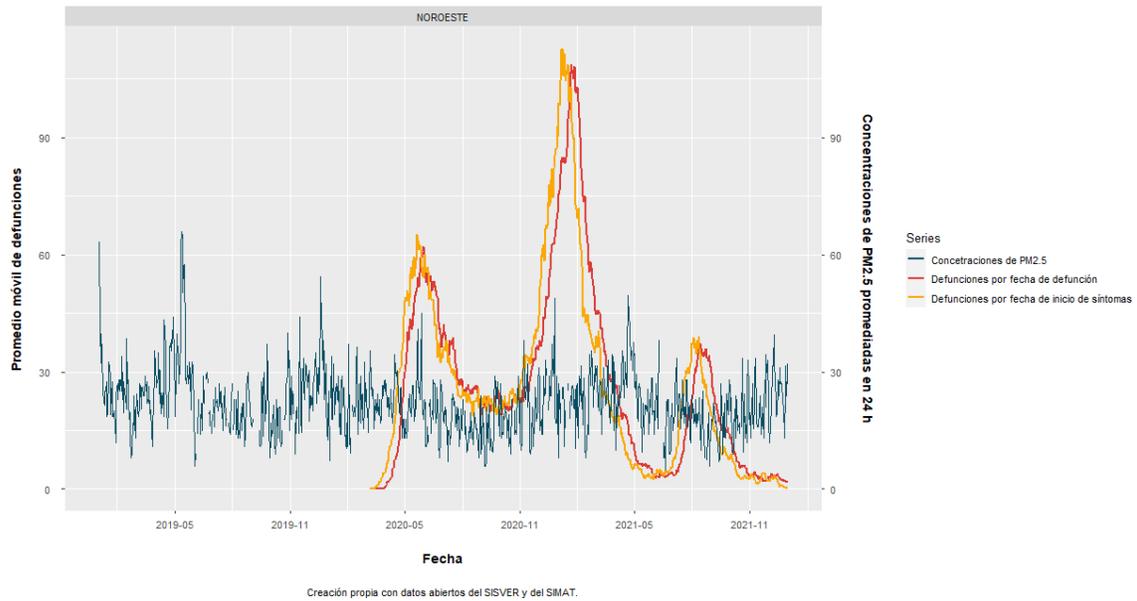


Gráfico 13. Promedios móviles de defunciones por fecha de defunción y fecha de inicio de síntomas y promedios en 24 h de PM_{2.5} en la Zona Noreste de la ZMVM.

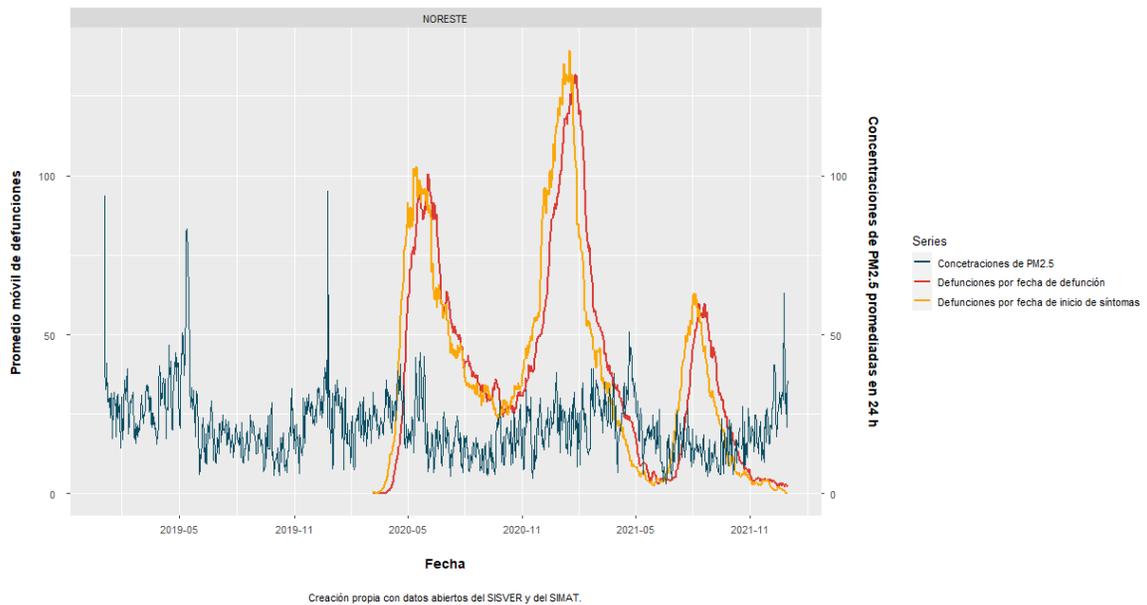


Gráfico 14. Promedios móviles de defunciones por fecha de defunción y fecha de inicio de síntomas y promedios en 24 h de PM_{2.5} en la Zona Suroeste de la ZMVM.

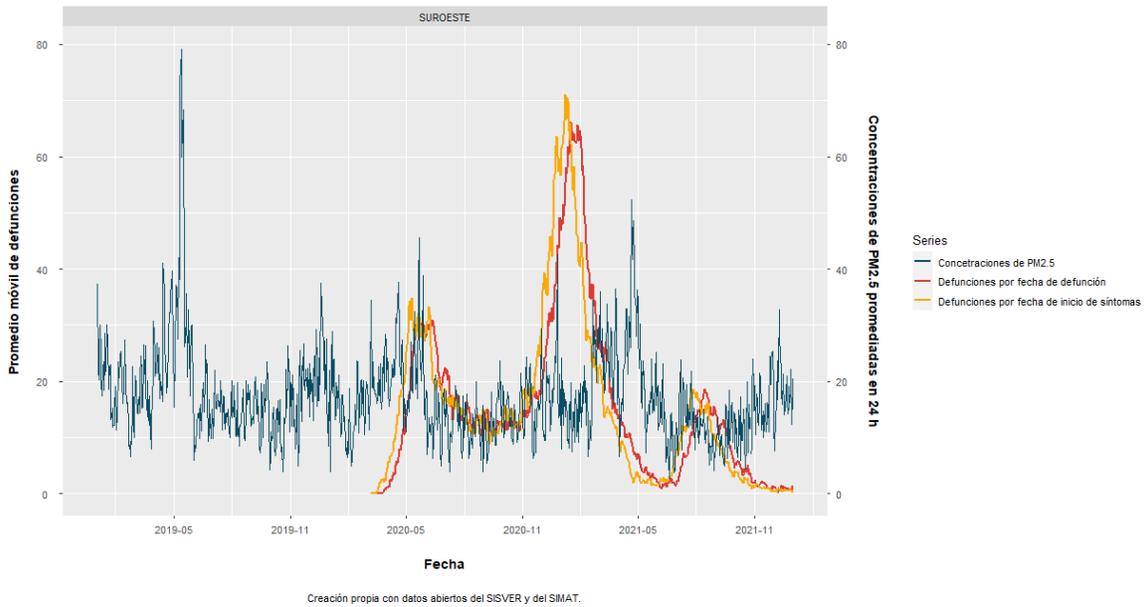
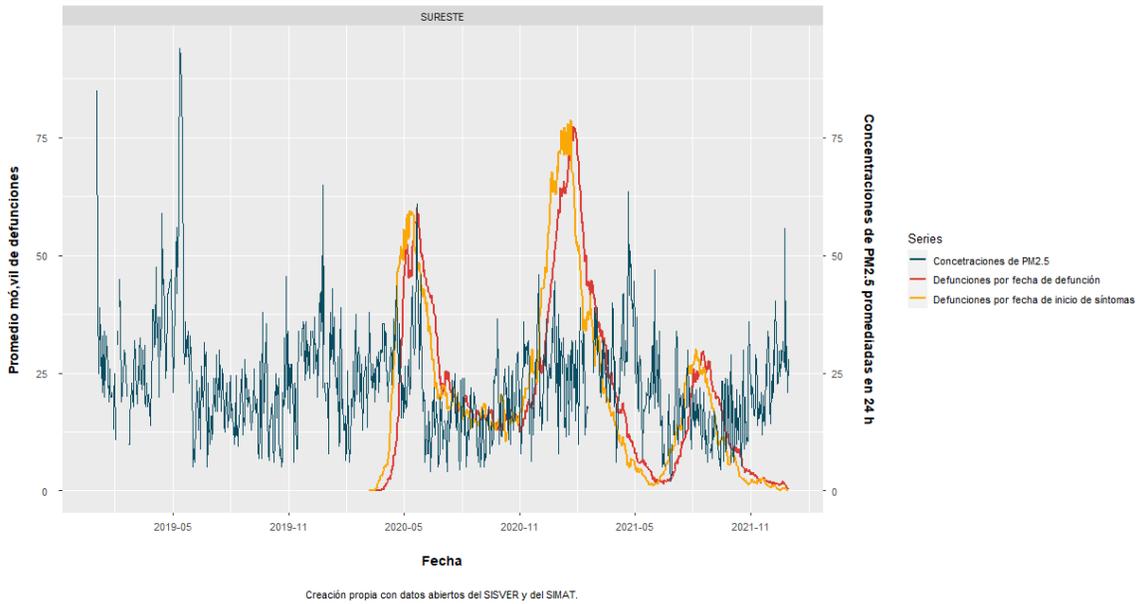


Gráfico 15. Promedios móviles de defunciones por fecha de defunción y fecha de inicio de síntomas y promedios en 24 h de PM_{2.5} en la Zona Sureste de la ZMVM.



Adicionalmente, se realizó el cálculo de los promedios semanales para las defunciones por COVID-19 por fecha de defunción y por fecha de inicio de síntomas; posteriormente se graficaron junto con los promedios semanales de las concentraciones de PM_{2.5} promediadas en 24 horas por zona geográfica de la ZMVM para realizar la comparación (Ver Gráficos 16 a 21).

Gráfico 16. Promedios semanales de defunciones por fecha de defunción y fecha de inicio de síntomas y promedios semanales de PM_{2.5} en la ZMVM.

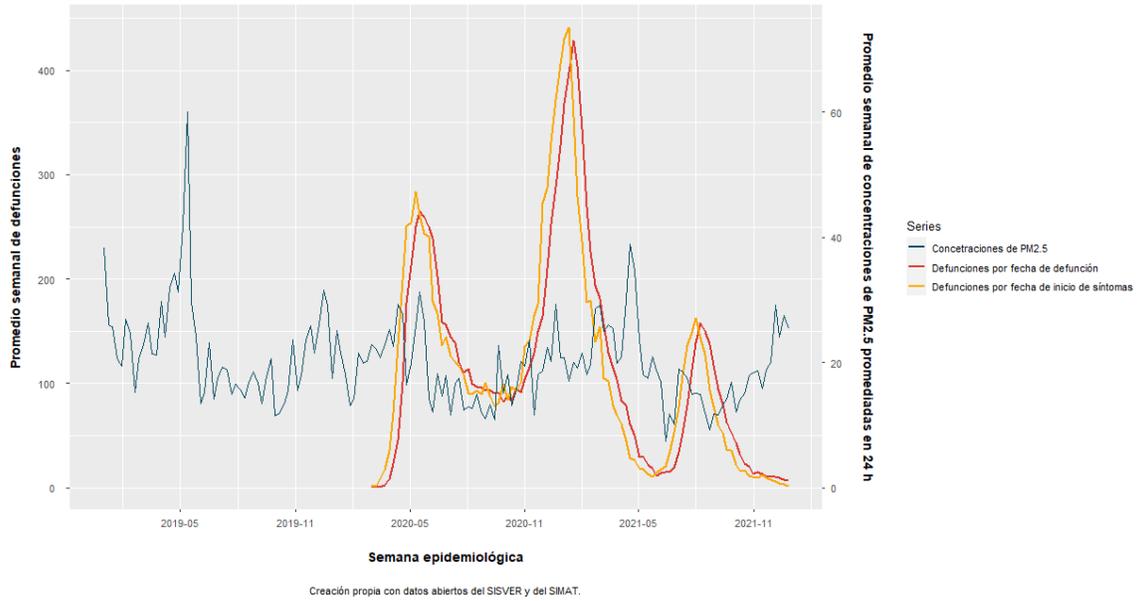


Gráfico 17. Promedios semanales de defunciones por fecha de defunción y fecha de inicio de síntomas y promedios semanales de PM_{2.5} en la Zona Centro de la ZMVM.

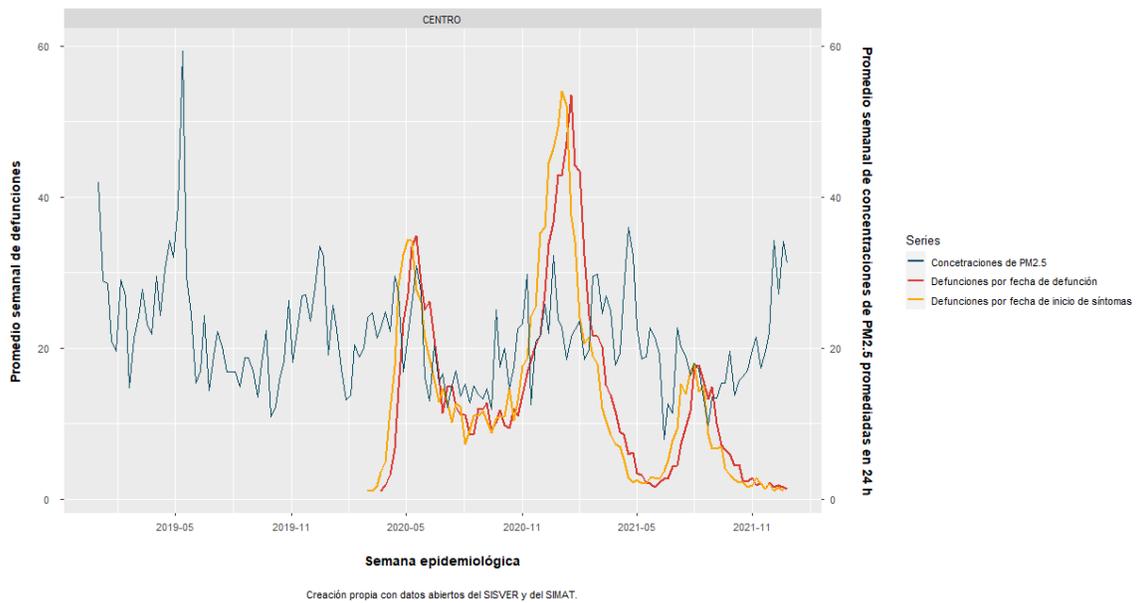


Gráfico 18. Promedios semanales de defunciones por fecha de defunción y fecha de inicio de síntomas y promedios semanales de PM_{2.5} en la Zona Noroeste de la ZMVM.

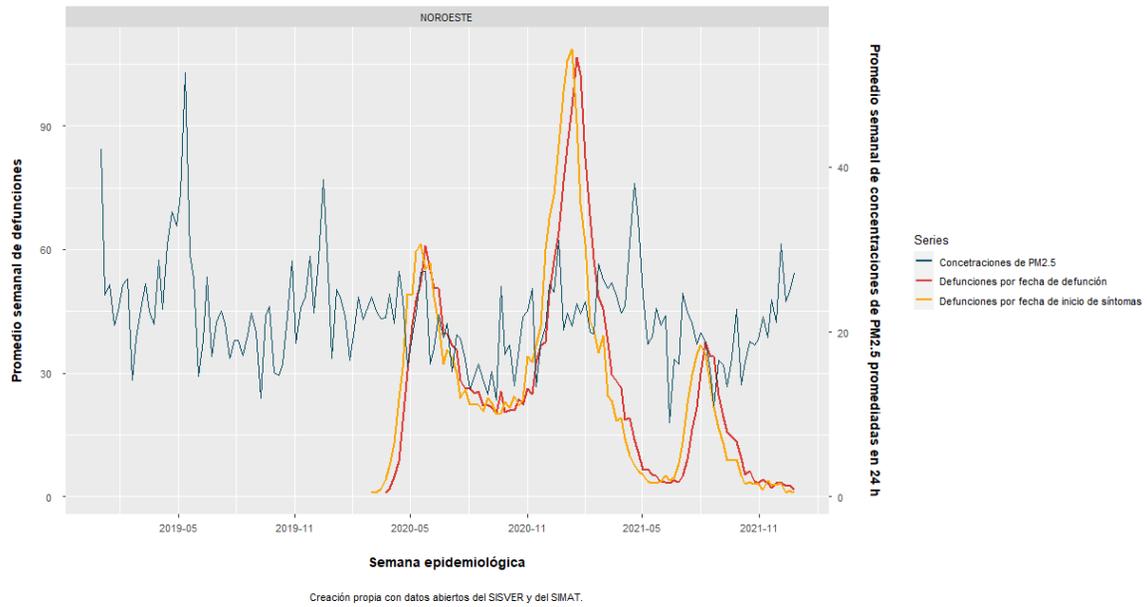


Gráfico 19. Promedios semanales de defunciones por fecha de defunción y fecha de inicio de síntomas y promedios semanales de PM_{2.5} en la Zona Noreste de la ZMVM.

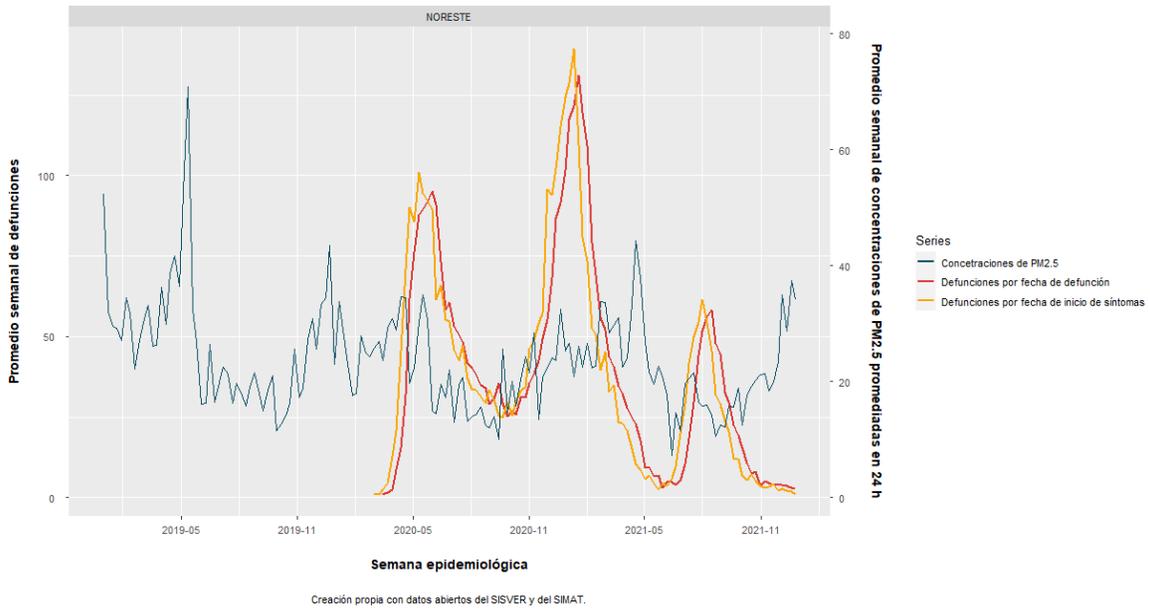


Gráfico 20. Promedios semanales de defunciones por fecha de defunción y fecha de inicio de síntomas y promedios semanales de PM_{2.5} en la Zona Suroeste de la ZMVM.

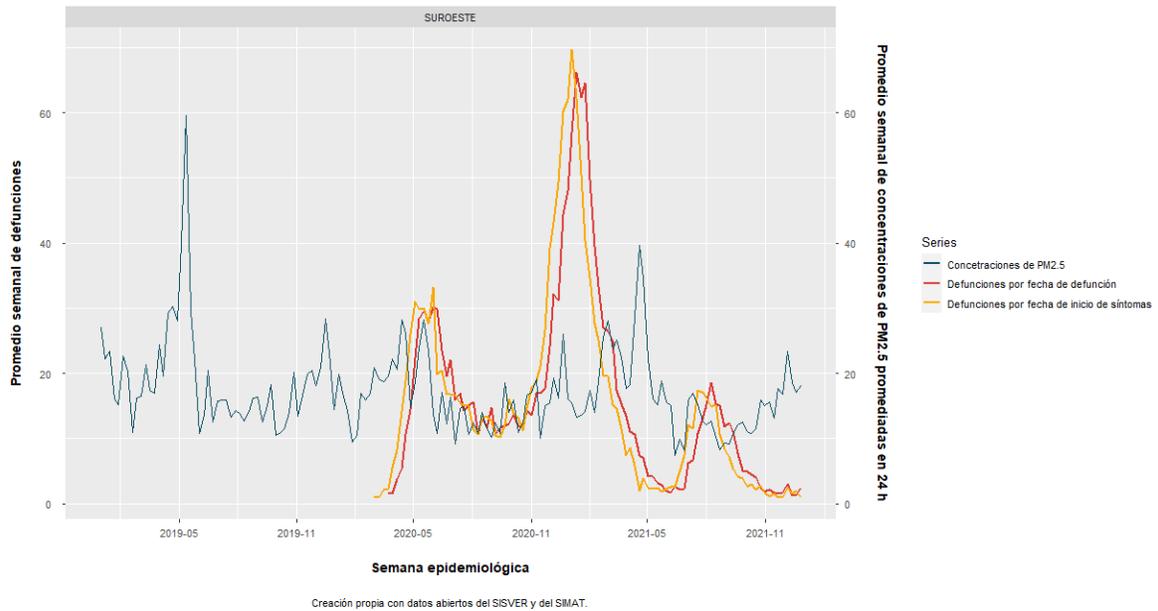
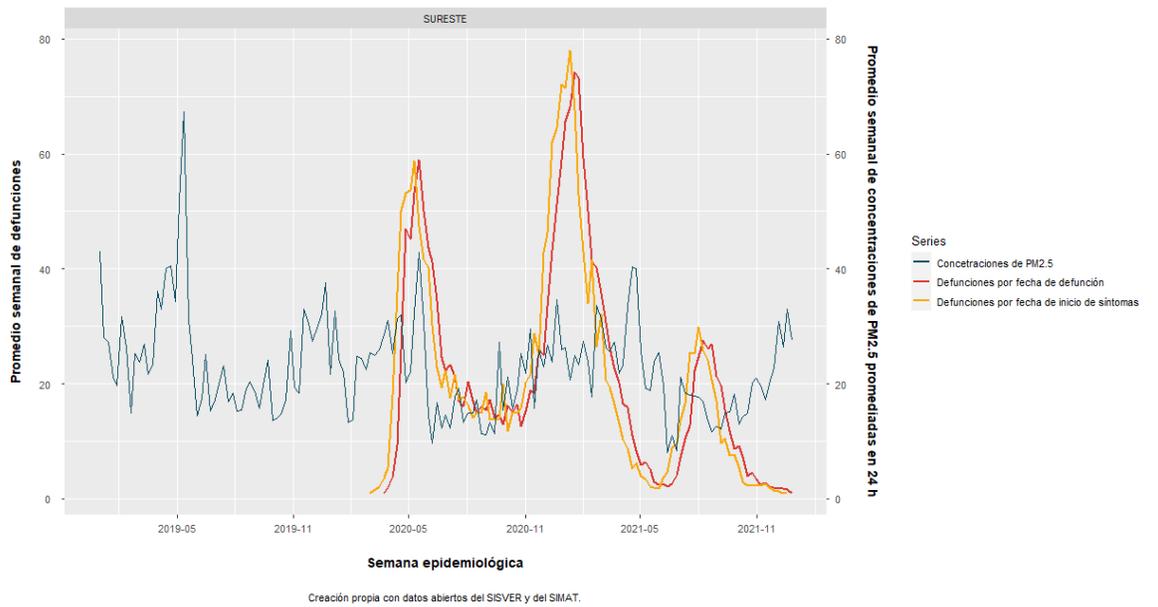


Gráfico 21. Promedios semanales de defunciones por fecha de defunción y fecha de inicio de síntomas y promedios semanales de PM_{2.5} en la Zona Sureste de la ZMVM.



En ambos grupos se observó que los picos de las defunciones se vieron antecidos por incrementos en las concentraciones de PM_{2.5} promediadas para 24 horas.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

Se realizó el conteo diario de defunciones por COVID-19 en la ZMVM por fecha de defunción y por fecha de inicio de síntomas, agrupadas por zona geográfica (Centro, Noroeste, Noreste, Suroeste y Sureste).

Para obtener las concentraciones diarias de $PM_{2.5}$ promediadas en 24 horas y los promedios diarios en 24 horas de la temperatura, humedad relativa y la velocidad del viento para todos los municipios seleccionados, se realizó una estimación de los datos mediante la técnica de interpolación espacial de la Distancia Inversa Ponderada (IDW por sus siglas en inglés de "*Inverse Distance Weighting*"). Esta técnica asume que los valores más cercanos están más relacionados que otros con su función, y es especialmente adecuada para estimar valores en puntos no muestreados, basados en valores conocidos de puntos circundantes en el espacio (87,88). Se utilizó el centroide de los AGEB como punto de referencia para estimar los valores. Posteriormente los datos obtenidos se agruparon por fecha y municipio, y finalmente por zona.

Es importante precisar que se obtuvieron los mismos resultados realizando el análisis por fecha de defunción y por fecha de inicio de síntomas.

Se observó la distribución del conteo de defunciones diarias por COVID-19 por fecha de defunción y por fecha de inicio de síntomas, en la ZMVM y por zona, durante el 1° de marzo del 2020 al 31 de diciembre de 2021 (Ver Gráficos 22 al 27). La media del recuento de defunciones en toda la ZMVM por día fue de 23 y la mediana de 16 (rango 0 - 149), en la Tabla 9 se muestran las medidas de tendencia central calculadas para cada una de las zonas.

Tabla 9. Medidas de tendencia central del conteo diario de defunciones por COVID-19 en la ZMVM por zona geográfica y por fecha de defunción y de inicio de síntomas, durante el periodo del 2020 al 2021.

Zona	Media del número de defunciones diarias	Mediana del número de defunciones diarias	Valor mínimo	Valor máximo
ZMVM	23.09	16	0	149
Centro	13.63	11	0	68
Noroeste	26.83	22	0	122
Noreste	38.73	32	0	149
Suroeste	15.37	12	0	83
Sureste	20.89	16	0	87

Gráfico 22. Distribución del número de defunciones por COVID-19 en la ZMVM, del 2020 al 2021.

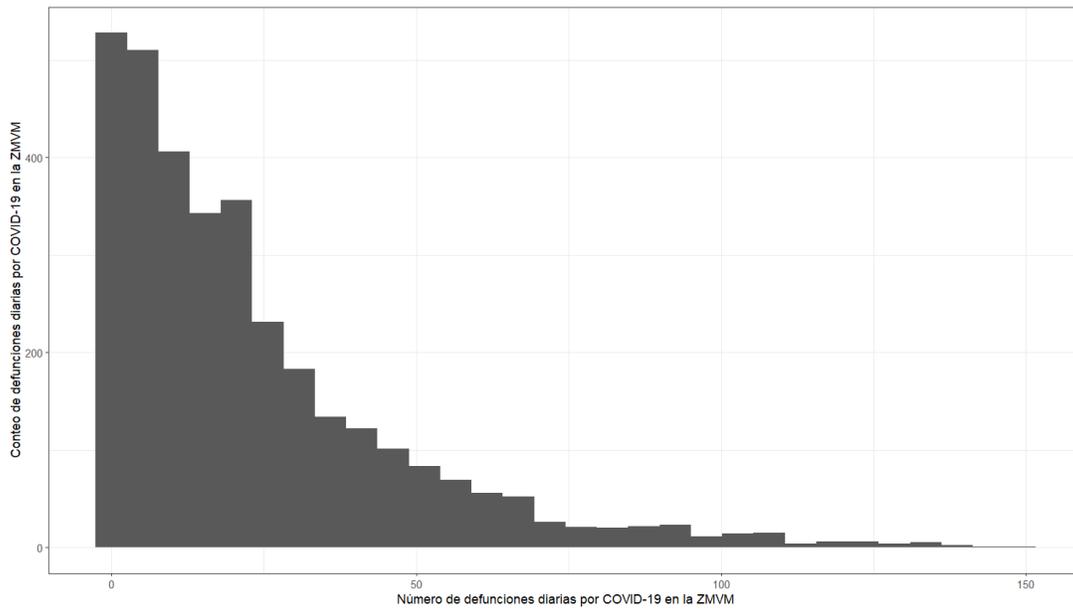


Gráfico 23. Distribución del número de defunciones diarias por COVID-19 en la zona Centro de la ZMVM, del 2020 al 2021.

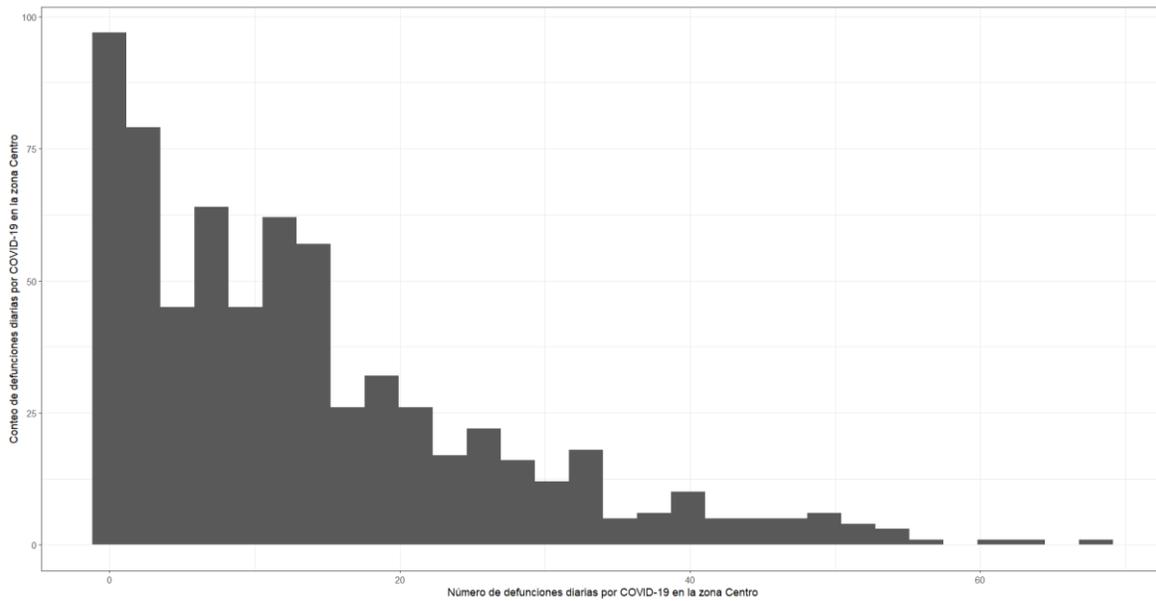


Gráfico 24. Distribución del número de defunciones diarias por COVID-19 en la zona Noroeste de la ZMVM, del 2020 al 2021.

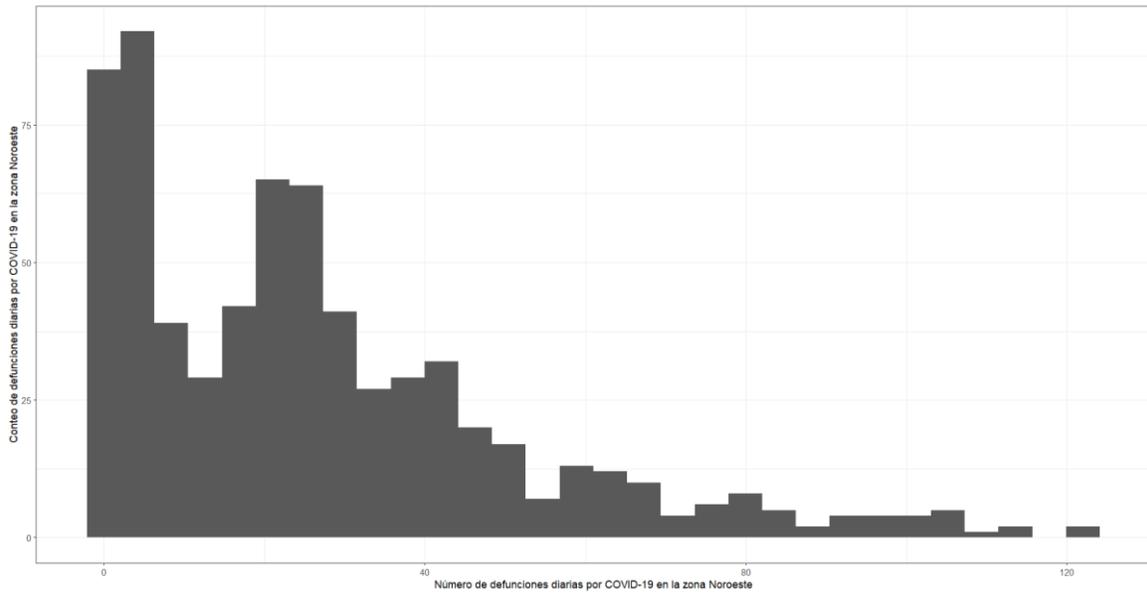


Gráfico 25. Distribución del número de defunciones diarias por COVID-19 en la zona Noreste de la ZMVM, del 2020 al 2021.

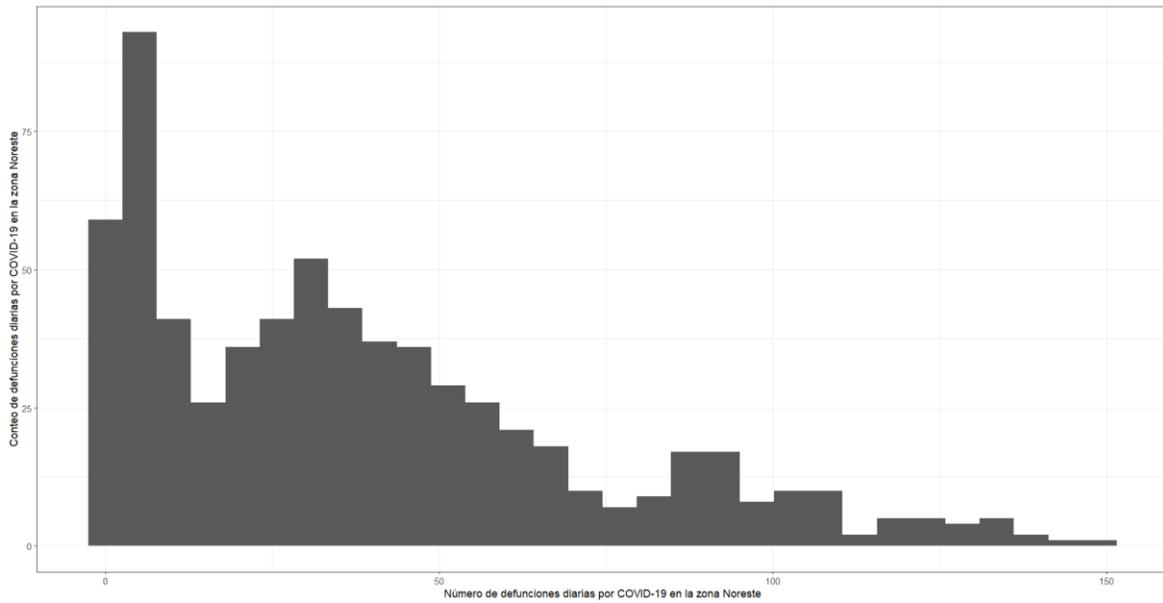


Gráfico 26. Distribución del número de defunciones diarias por COVID-19 en la zona Suroeste de la ZMVM, del 2020 al 2021.

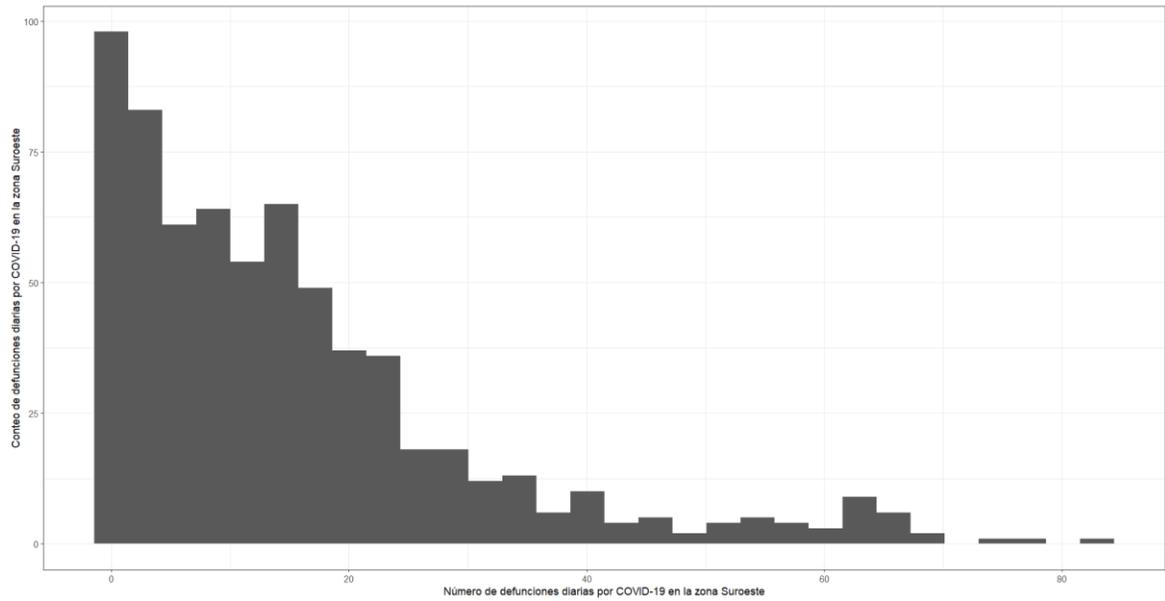
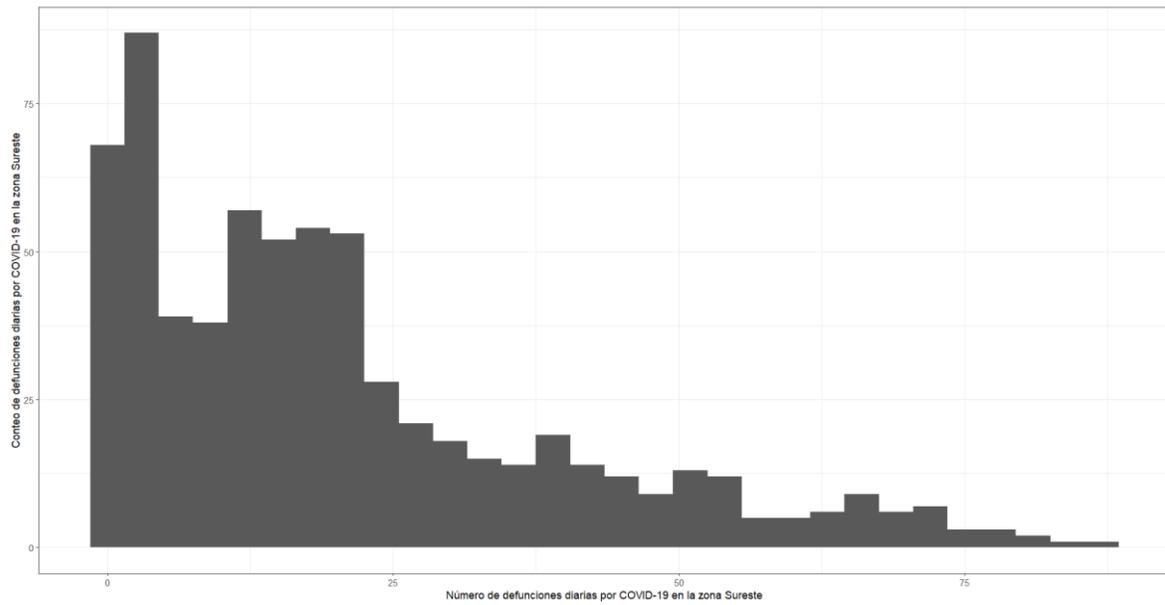


Gráfico 27. Distribución del número de defunciones diarias por COVID-19 en la zona Sureste de la ZMVM, del 2020 al 2021.



Se creó un gráfico de dispersión para visualizar la relación entre el conteo diario de las defunciones por COVID-19 y las concentraciones diarias de $PM_{2.5}$ promediadas en 24 horas en la ZMVM y en cada una de las zonas (Ver Gráficos 28 a 33).

Gráfico 28. Relación entre el número de defunciones diarias por COVID-19 y las concentraciones diarias de $PM_{2.5}$ promediadas en 24 horas, en la ZMVM durante el periodo del 2020 al 2021.

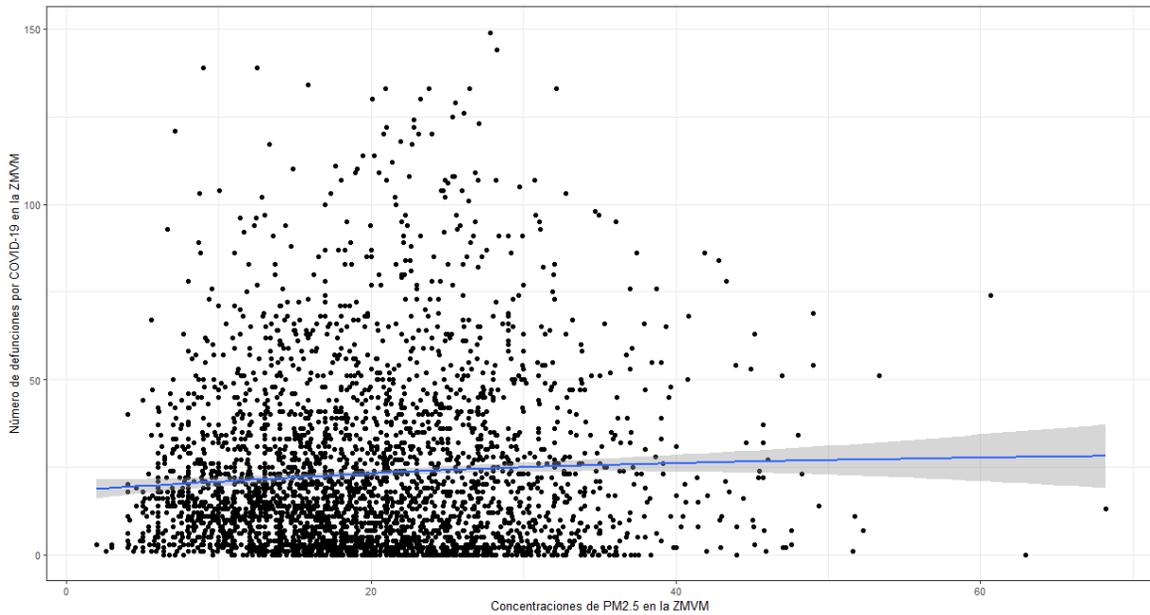


Gráfico 29. Relación entre el número de defunciones diarias por COVID-19 y las concentraciones diarias de $PM_{2.5}$ promediadas en 24 horas, en la zona Centro de la ZMVM durante el periodo del 2020 al 2021.

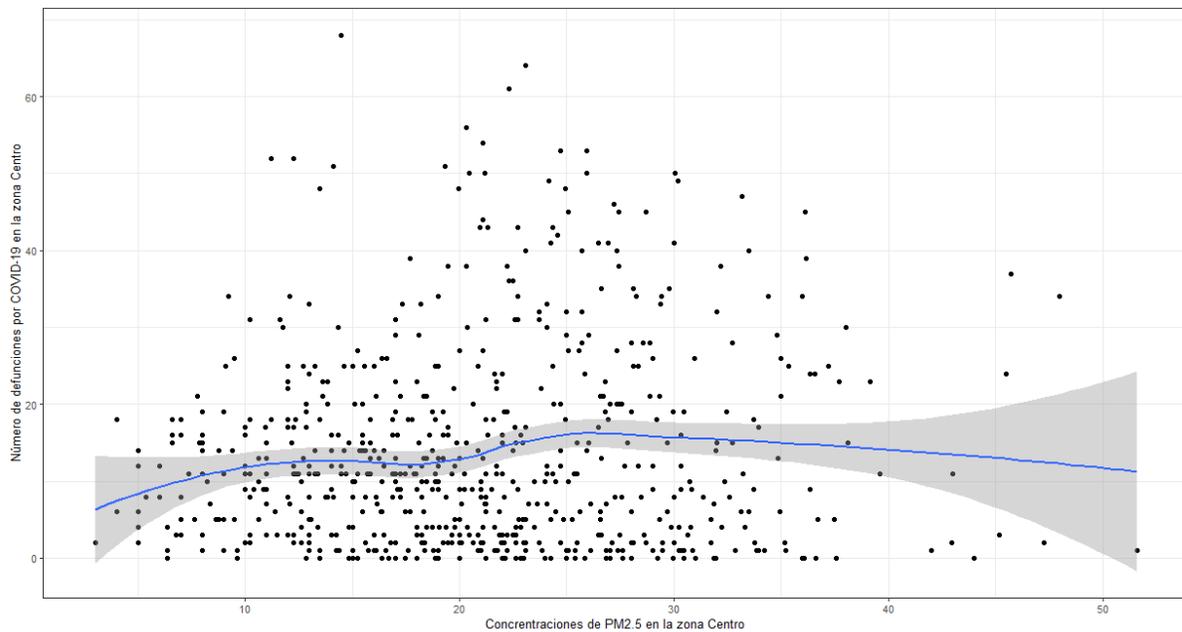


Gráfico 30. Relación entre el número de defunciones diarias por COVID-19 y las concentraciones diarias de PM_{2.5} promediadas en 24 horas, en la zona Noroeste de la ZMVM durante el periodo del 2020 al 2021.

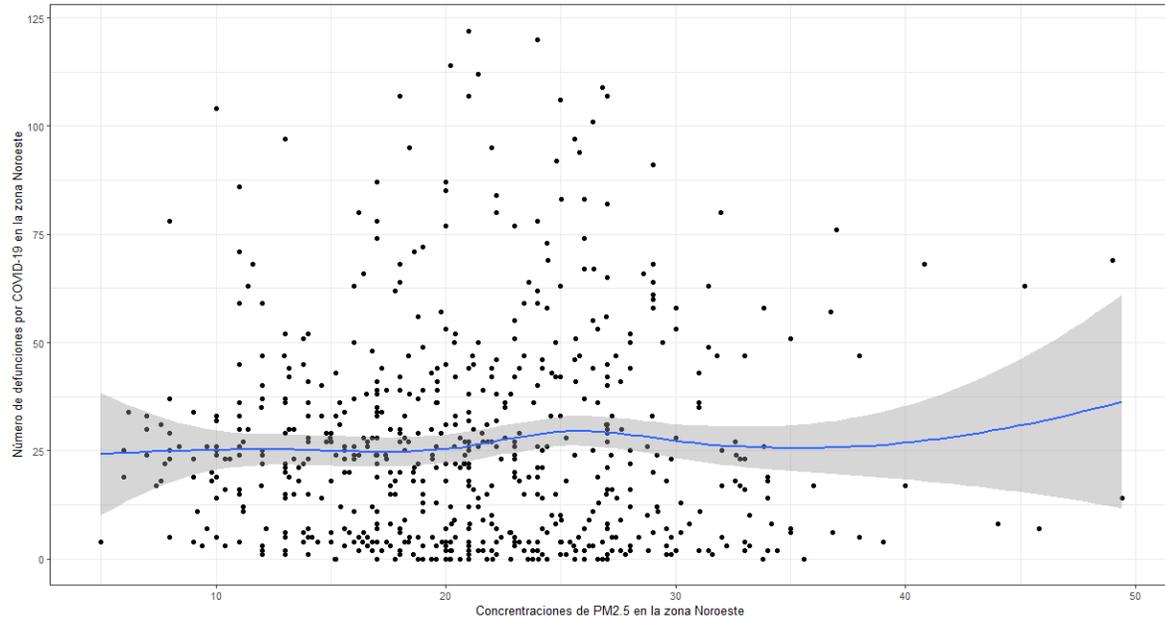


Gráfico 31. Relación entre el número de defunciones diarias por COVID-19 y las concentraciones diarias de PM_{2.5} promediadas en 24 horas, en la zona Noreste de la ZMVM durante el periodo del 2020 al 2021.

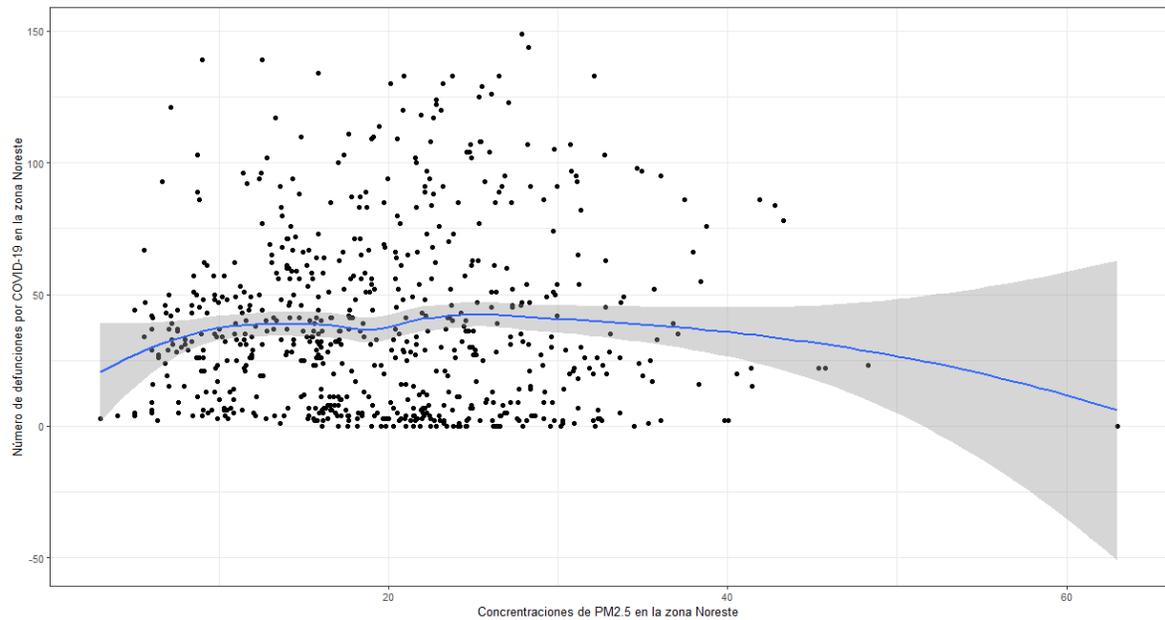


Gráfico 32. Relación entre el número de defunciones diarias por COVID-19 y las concentraciones diarias de PM_{2.5} promediadas en 24 horas, en la zona Suroeste de la ZMVM durante el periodo del 2020 al 2021.

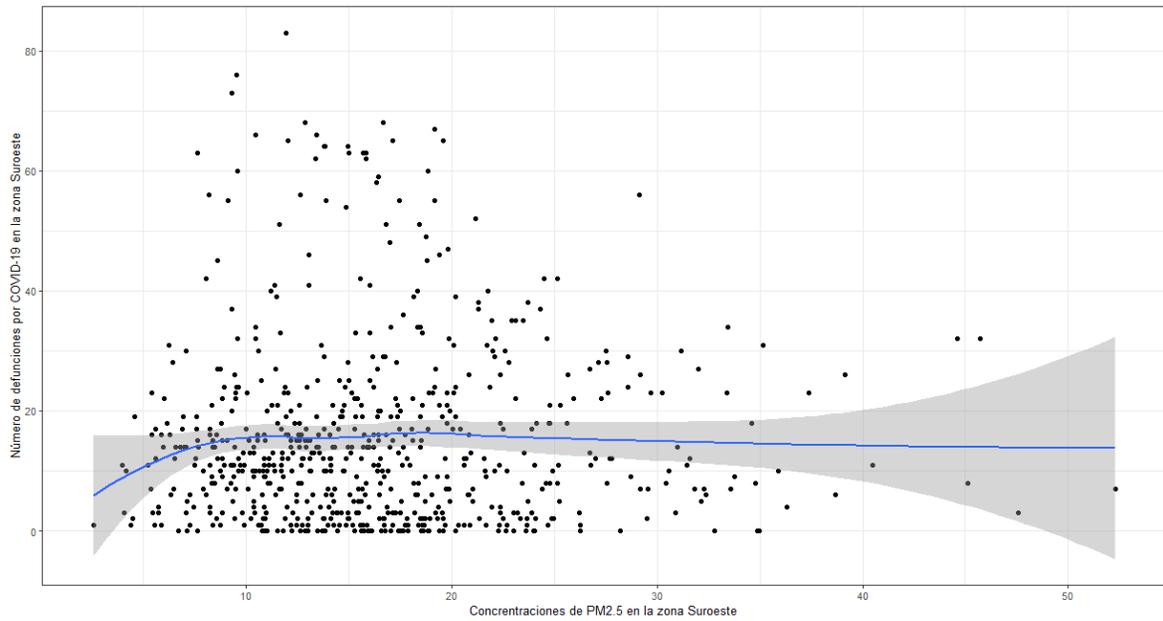
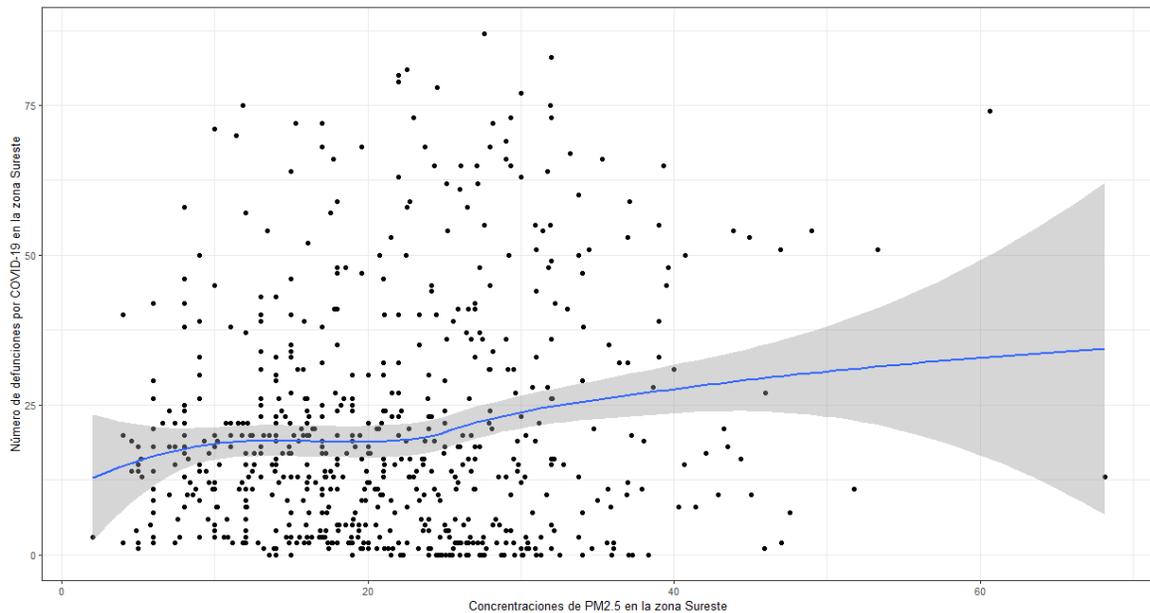


Gráfico 33. Relación entre el número de defunciones diarias por COVID-19 y las concentraciones diarias de PM_{2.5} promediadas en 24 horas, en la zona Sureste de la ZMVM durante el periodo del 2020 al 2021.

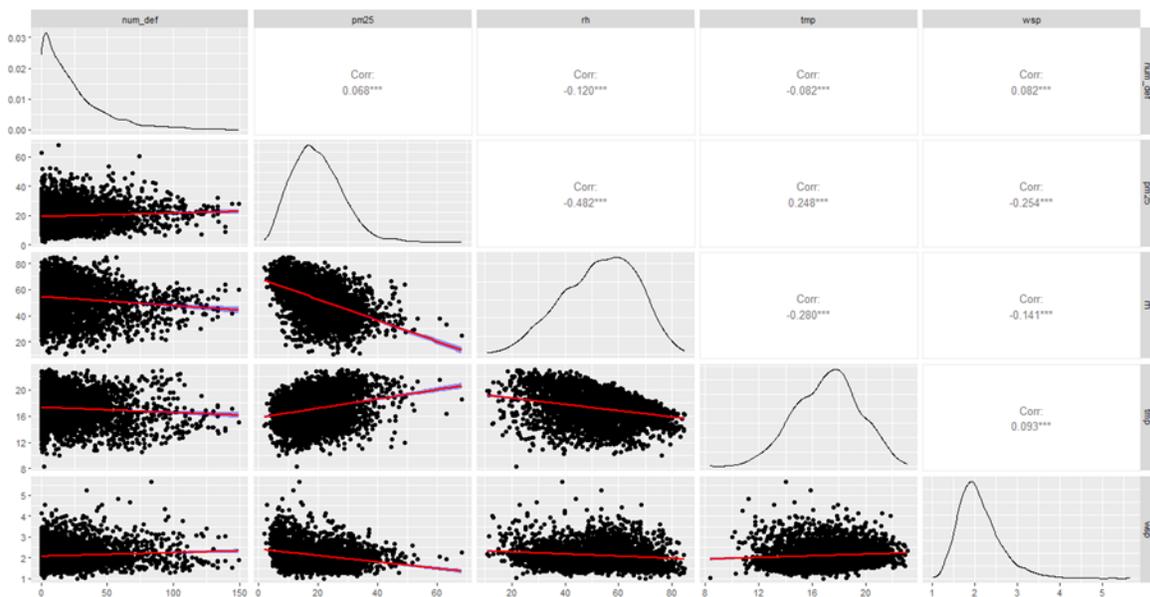


Se observó que el patrón general fue variable, para cada una de las zonas analizadas en comparación con el análisis de toda la ZMVM. En el gráfico de la ZMVM (Gráfico 28) se

observa un patrón ligeramente ascendente, lo cual podría sugerir una posible relación positiva entre las concentraciones de $PM_{2.5}$ y el número de defunciones por COVID-19. Los puntos se agrupan de manera ascendente, entre las concentraciones de 0 a $40 \mu g/m^3$, sin embargo, se observa una gran dispersión de los puntos alrededor de la línea, así como algunos fuera del patrón general. En el resto de las zonas no se logra identificar un adecuado patrón (Gráfico 33).

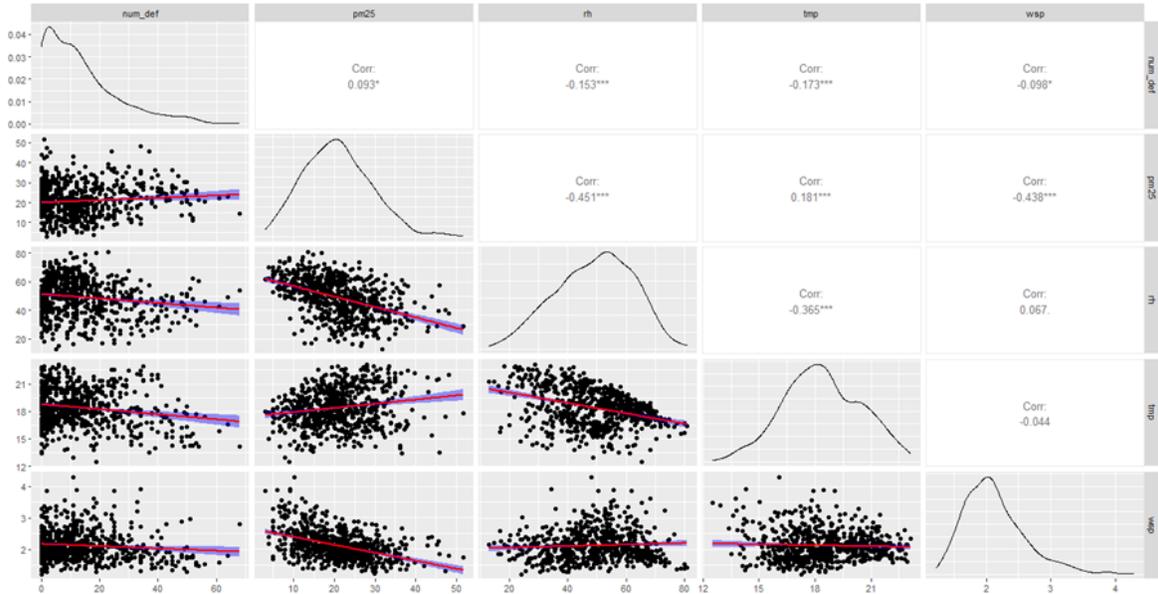
Se creó una matriz de gráficos de dispersión y se calculó una correlación de Pearson entre el número de defunciones diarias por COVID-19 y las concentraciones de $PM_{2.5}$, para visualizar la relación lineal entre las variables a analizar para la ZMVM y para cada una de las zonas (Ver Gráficos 34 a 39). Se obtuvieron correlaciones positivas bajas para todas las zonas analizadas, sin embargo, sólo resultaron estadísticamente significativas ($p < 0.05$) para la ZMVM en general, la zona Centro y la zona Sureste.

Gráfico 34. Matriz de dispersión de las relaciones entre el número de defunciones por COVID-19, las concentraciones de $PM_{2.5}$ y los registros de humedad, temperatura y velocidad del viento en la ZMVM, durante el periodo de 2020 a 2021.



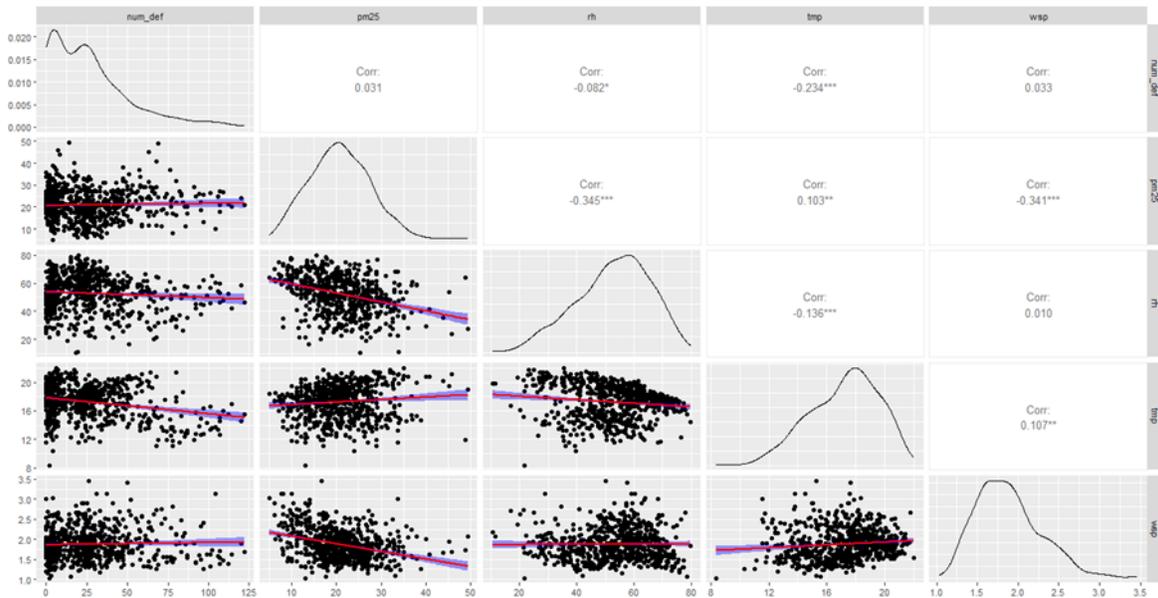
num_def: número de defunciones, pm25: concentraciones de $PM_{2.5}$, rh: humedad relativa, tmp: temperatura, wsp: velocidad del viento.

Gráfico 35. Matriz de dispersión de las relaciones entre el número de defunciones por COVID-19, las concentraciones de PM_{2.5} y los registros de humedad, temperatura y velocidad del viento en la zona Centro de la ZMVM, durante el periodo de 2020 a 2021.



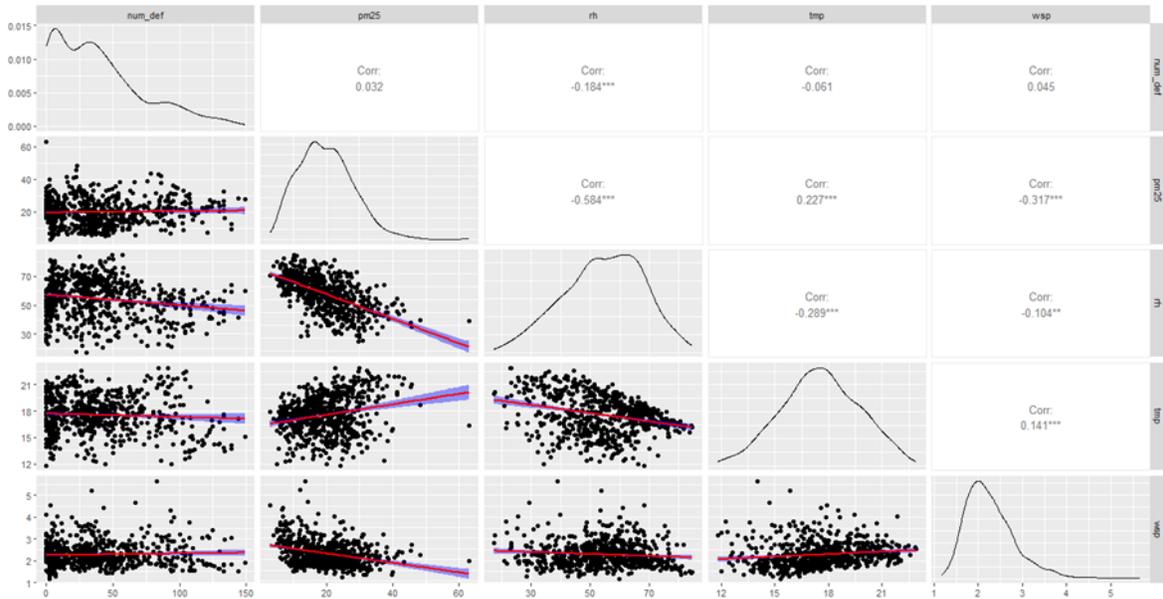
num_def: número de defunciones, pm25: concentraciones de PM_{2.5}, rh: humedad relativa, tmp: temperatura, wsp: velocidad del viento.

Gráfico 36. Matriz de dispersión de las relaciones entre el número de defunciones por COVID-19, las concentraciones de PM_{2.5} y los registros de humedad, temperatura y velocidad del viento en la zona Noroeste de la ZMVM, durante el periodo de 2020 a 2021.



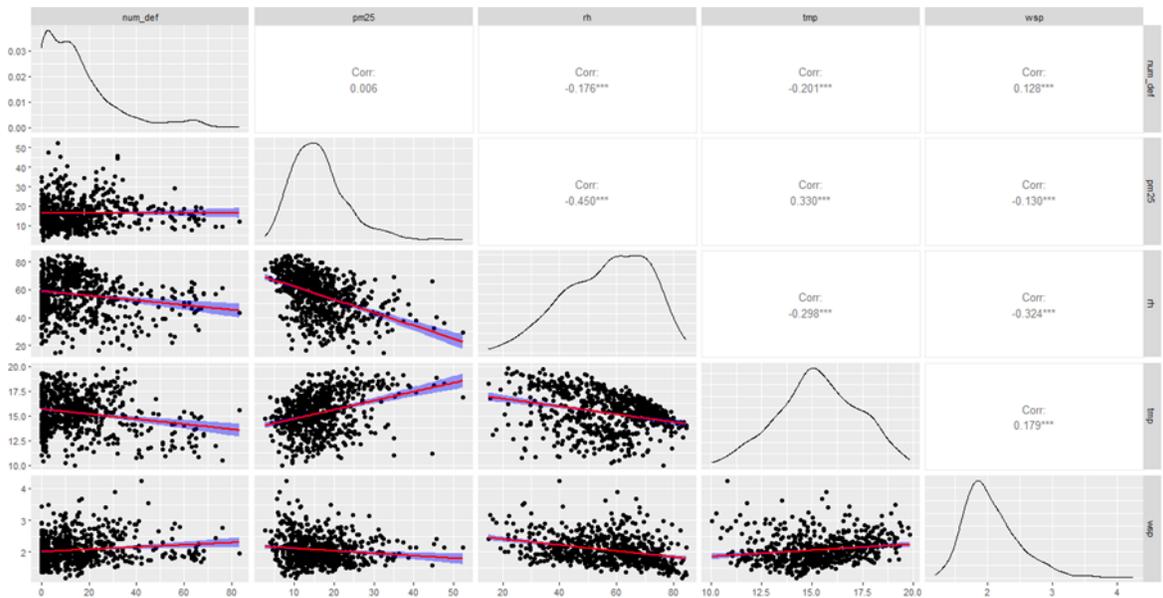
num_def: número de defunciones, pm25: concentraciones de PM_{2.5}, rh: humedad relativa, tmp: temperatura, wsp: velocidad del viento.

Gráfico 37. Matriz de dispersión de las relaciones entre el número de defunciones por COVID-19, las concentraciones de PM_{2.5} y los registros de humedad, temperatura y velocidad del viento en la zona Noreste de la ZMVM, durante el periodo de 2020 a 2021.



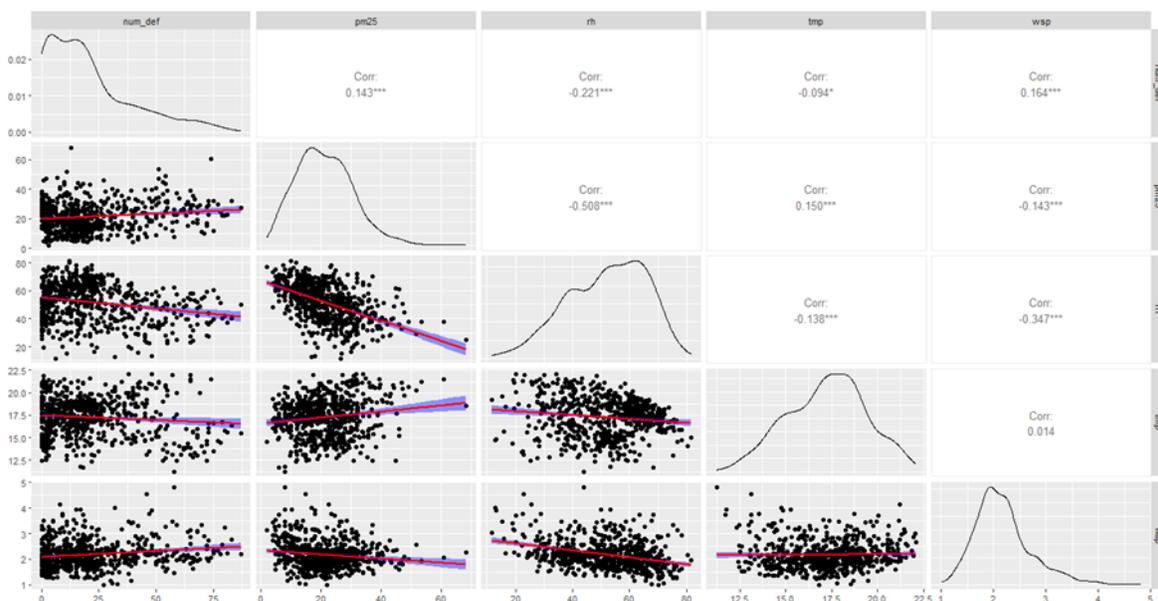
num_def: número de defunciones, pm25: concentraciones de PM_{2.5}, rh: humedad relativa, tmp: temperatura, wsp: velocidad del viento.

Gráfico 38. Matriz de dispersión de las relaciones entre el número de defunciones por COVID-19, las concentraciones de PM_{2.5} y los registros de humedad, temperatura y velocidad del viento en la zona Suroeste de la ZMVM, durante el periodo de 2020 a 2021.



num_def: número de defunciones, pm25: concentraciones de PM_{2.5}, rh: humedad relativa, tmp: temperatura, wsp: velocidad del viento.

Gráfico 39. Matriz de dispersión de las relaciones entre el número de defunciones por COVID-19, las concentraciones de PM_{2.5} y los registros de humedad, temperatura y velocidad del viento en la zona Sureste de la ZMVM, durante el periodo de 2020 a 2021.



num_def: número de defunciones, pm25: concentraciones de PM_{2.5}, rh: humedad relativa, tmp: temperatura, wsp: velocidad del viento.

Debido a la distribución de los datos se calculó una correlación de Spearman entre el número de defunciones diarias por COVID-19 y las concentraciones de PM_{2.5} para la ZMVM y cada una de las zonas (Ver Tabla 10). Se observa que en todas las zonas los resultados de la correlación se encuentran cercanas al 0, lo cual indica una correlación débil o nula, todos los valores p obtenidos fueron >0.05 , lo cual indica que las correlaciones pudieran deberse al azar y no son estadísticamente significativas. Cabe destacar que la correlación de Spearman es menos sensible a los valores atípicos, en comparación con la correlación de Pearson, y solo captura relaciones monotónicas que pueden ser lineales o no lineales.

Tabla 10. Cálculo de la correlación de Spearman entre las defunciones diarias por COVID-19 y las concentraciones de PM_{2.5} para la ZMVM y cada una de las zonas, durante el periodo del 2020 al 2021.

Zona	Correlación de Spearman	Valor de p
ZMVM	0.010	0.558
Centro	0.025	0.511
Noroeste	-0.024	0.546
Noreste	-0.035	0.368
Suroeste	0.003	0.948
Sureste	0.038	0.334

Posteriormente se realizó un modelo de regresión de Poisson para toda la ZMVM y posteriormente para cada zona: Centro, Noroeste, Noreste, Suroeste y Sureste, debido a la distribución de los datos y a que este modelo es adecuado para estimar conteos, dados ciertos valores en los predictores, los cuales se asumen que son independientes.

$$\log(Y) = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p$$

En donde:

Y = variable respuesta (número de defunciones)

α y β = coeficientes numéricos

X = variables predictoras (concentraciones de $PM_{2.5}$ y los registros de humedad, temperatura y velocidad del viento)

Se realizó la prueba de bondad de ajuste para evaluar la existencia de sobredispersión de los datos (diferencia entre la media y la varianza), obteniendo una $p < 0.05$, demostrando la existencia de sobredispersión.

Debido a lo anterior, para proporcionar un ajuste más adecuado de los datos de conteo, se realizó una regresión Binomial Negativa. Obteniendo los coeficientes, los errores estándar, los valores z y los valores p para cada variable.

Subsiguientemente se calcularon los riesgos relativos (RR) mediante los coeficientes exponenciados, para la mortalidad por COVID-19 en relación con las concentraciones de $PM_{2.5}$ así como sus intervalos de confianza al 95 % (IC 95 %).

Encontrando que el modelo para toda la ZMVM resultó estadísticamente significativo para evaluar la relación entre el número de defunciones diarias por COVID-19 y las concentraciones diarias de $PM_{2.5}$ promediadas en 24 horas. El modelo mostró un incremento porcentual del 1 % (IC95 %: 0.41 % - 1.6 %) de las defunciones por COVID-19 diarias por cada incremento de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el promedio diario de $PM_{2.5}$. Esto significa que por cada $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el promedio diario de $PM_{2.5}$ se presentó un incremento del 20 % en el número de defunciones. Siendo la media de defunciones diarias para la ZMVM 23.09 el incremento de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $PM_{2.5}$ representó un incremento de 4.62 defunciones por COVID-19.

Al estratificar por zonas se observó que únicamente el modelo para la zona Sureste resultó estadísticamente significativo para evaluar la relación entre el número de defunciones diarias por COVID-19 y las concentraciones diarias de $PM_{2.5}$ promediadas en 24 horas. El modelo mostró un incremento porcentual del 1.11 % (IC95 %: 0.09 % - 2.2 %) de las defunciones por COVID-19 diarias por cada incremento de $1 \mu g/m^3$ en el promedio diario de $PM_{2.5}$. Esto significa que por cada $20 \mu g/m^3$ en el promedio diario de $PM_{2.5}$ se presentó un incremento del 22.2 % en el número de defunciones. Siendo la media de defunciones diarias para la zona Sureste de 20.89 el incremento de $20 \mu g/m^3$ de $PM_{2.5}$ representó un incremento de 4.64 defunciones por COVID-19.

En la Tabla 11 se muestran los Riesgos Relativos (RR) calculados junto con los Intervalos de Confianza al 95 % (IC 95 %) para el número de defunciones por COVID-19 en relación con las concentraciones de $PM_{2.5}$ por zonas de la ZMVM, ajustados por las variables meteorológicas: humedad relativa, temperatura y velocidad del viento.

Tabla 11. Cálculo del Riesgo Relativo (RR) y los Intervalos de Confianza al 95 % (IC 95 %) para el número de defunciones diarias por COVID-19 en relación con las concentraciones diarias de PM_{2.5} promediadas en 24 horas, por zonas de la ZMVM, para el periodo 2020 a 2021.

ZMVM							
Variable	Coeficientes	Error estándar	Valor Z	Valor p	RR	IC 95%	
WSP	0.202581	0.040554	4.995	<0.001	1.2245597	1.1317285	1.3262505
RH	-0.007033	0.001643	-4.282	<0.001	0.9929912	0.9897127	0.9962576
TMP	-0.046385	0.008358	-5.55	<0.001	0.9546743	0.9397794	0.9697351
PM _{2.5}	0.00981	0.002816	3.484	<0.001	1.0098584	1.0041029	1.0157086
CENTRO							
Variable	Coeficientes	Error estándar	Valor Z	Valor p	RR	IC 95%	
WSP	-0.152167	0.091735	-1.659	<0.05	0.8588452	0.7237835	1.0218967
RH	-0.015659	0.00347	-4.513	<0.001	0.9844634	0.9775938	0.9912914
TMP	-0.1007	0.019993	-5.037	<0.001	0.9042042	0.8707336	0.9385525
PM _{2.5}	0.000689	0.005928	0.116	>0.05	1.0006892	0.9889132	1.0128032
NOROESTE							
Variable	Coeficientes	Error estándar	Valor Z	Valor p	RR	IC 95%	
WSP	0.200884	0.108046	1.859	<0.001	1.222483	0.986047	1.5205961
RH	-0.006485	0.003253	-1.994	<0.05	0.9935359	0.9870961	0.9999275
TMP	-0.084172	0.016845	-4.997	<0.01	0.9192734	0.8895088	0.9495807
PM _{2.5}	0.006347	0.006385	0.994	>0.05	1.0063673	0.9936194	1.0195648
NORESTE							
Variable	Coeficientes	Error estándar	Valor Z	Valor p	RR	IC 95%	
WSP	-0.009418	0.077864	-0.121	>0.05	0.9906267	0.8499196	1.1603115
RH	-0.017712	0.003868	-4.579	<0.001	0.9824438	0.9746113	0.9902367
TMP	-0.034497	0.019029	-1.813	<0.05	0.9660914	0.9322919	1.0007405
PM _{2.5}	-0.011464	0.006636	-1.727	<0.05	0.9886018	0.9754457	1.0021866
SUROESTE							
Variable	Coeficientes	Error estándar	Valor Z	Valor p	RR	IC 95%	
WSP	0.251369	0.103136	2.437	<0.01	1.2857845	1.049452	1.5840705
RH	-0.013111	0.003287	-3.989	<0.001	0.9869742	0.980532	0.9933413
TMP	-0.124933	0.021707	-5.755	<0.001	0.8825556	0.845707	0.9203892
PM _{2.5}	0.004343	0.006739	0.645	>0.05	1.0043529	0.99101	1.0182716
SURESTE							
Variable	Coeficientes	Error estándar	Valor Z	Valor p	RR	IC 95%	
WSP	0.225292	0.085018	2.65	<0.001	1.252689	1.053241	1.493023
RH	-0.006303	0.003886	-1.622	>0.05	0.9937167	0.9857112	1.001686
TMP	-0.028652	0.018637	-1.537	>0.05	0.9717542	0.9383815	1.006201
PM _{2.5}	0.011022	0.005237	2.105	<0.01	1.0110834	1.0008804	1.021616

WSP: velocidad del viento, RH: humedad relativa, TMP: temperatura, PM_{2.5}: concentraciones de PM_{2.5}

DISCUSIÓN

Un incremento de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en las concentraciones diarias de $\text{PM}_{2.5}$ se asociaron con el incremento del 1 % (IC95 %: 0.41 % - 1.6 %) y del 1.11 % (IC95 %: 0.09 % - 2.2 %) en el número de defunciones por COVID-19 en la ZMVM y la zona Sureste de la ZMVM, respectivamente durante el periodo de estudio. Nuestros hallazgos concuerdan con los resultados de Bonilla et al, quienes encontraron que el riesgo de muerte por COVID-19 aumenta en un 2.4 % por cada incremento de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$ en diversos municipios de México durante el 2020 (89). El incremento observado, si bien más pequeño, concuerda con otros estudios realizados para la Ciudad de México. Kutralam-Muniasamy et al., encontró una correlación positiva entre $\text{PM}_{2.5}$ y la mortalidad por COVID-19 en la Ciudad de México durante el periodo del 1° de abril al 31 de mayo del 2020 (12), y López-Feldman et al. encontró, con datos de defunciones hasta el 28 de octubre de 2020, que un incremento de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$ podría incrementar en aproximadamente 7.4 % el riesgo de morir por COVID-19 (90). Por otro lado, el estudio realizado por Cabrera-Cano et al. encontró, con datos obtenidos para el periodo de febrero a junio de 2020 de 25 ciudades mexicanas, un incremento de 1.8 % (IC 95%: 0.991 – 1.044) de la tasa de mortalidad por COVID-19 por cada $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$, el cual no fue significativo (18).

Los hallazgos también fueron consistentes con estudios realizados en otros países. De acuerdo con el estudio de Pozzer et al., se estimó que la exposición a largo plazo al material particulado $\text{PM}_{2.5}$ contribuyó en aproximadamente un 15 % a la mortalidad por COVID-19 de manera global (IC 95%: 7 % - 33 %), 27 % (13 % - 46 %) en el Sudeste Asiático, 19 % (IC 95%: 8 % - 41 %) en Europa y 17 % (IC95 % 6 % - 39 %) en Norteamérica (73). Wu y colaboradores reportaron un incremento del 11 % (IC 95%: 6 % – 17 %) en la tasa de mortalidad por COVID-19 por cada incremento de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$ en los EE. UU., con datos hasta el 16 de junio de 2020 (16), mientras que Frontera et al., encontró que la mortalidad fue el doble en las regiones con mayores concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ que en las menos contaminadas en distintas regiones de Italia, con datos hasta el 31 de marzo de 2020, considerando la exposición a $\text{PM}_{2.5}$ con un mes previo a la ocurrencia de la defunción (72).

Se observó una marcada disminución de las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ en todas las zonas de la ZMVM a partir del 2020, secundario a la restricción de la movilidad, como parte de las medidas de salud pública implementadas debido a la pandemia de COVID-19. Dichas

concentraciones presentaron un incremento durante el 2021 posterior al relajamiento de las medidas, al incremento de la movilidad y a la reactivación de las actividades en la ZMVM.

La zona Sureste fue la que mayores concentraciones de $PM_{2.5}$ presentó durante el periodo de estudio, en comparación con las cuatro zonas restantes. Así mismo, la alcaldía de Iztapalapa perteneciente a esta zona se mantuvo como el municipio con la tasa de mortalidad más elevada por COVID-19 durante los dos años evaluados, lo cual podría contribuir a los hallazgos de nuestro estudio.

CONCLUSIONES

Nuestros resultados mostraron una asociación significativa entre la exposición a corto plazo entre las concentraciones de $PM_{2.5}$ y las defunciones diarias por COVID-19 en la ZMVM a nivel general y de manera específica en la zona Sureste durante el periodo del 1° de marzo de 2020 al 31 de diciembre de 2021.

Nuestros hallazgos concuerdan con otros estudios realizados a nivel nacional como en otros países, aunque estos varían en el estudio de los efectos de la exposición a corto y largo plazo a $PM_{2.5}$.

Los estudios ecológicos permiten hacer conclusiones a nivel de un área geográfica, lo que los hace útiles para la creación e implementación de políticas públicas. Conocer las áreas mayormente afectadas permitirá elaborar estrategias ambientales más estrictas o actualizar la normatividad existente, para mitigar e incluso prevenir desenlaces en la salud de la población como el agravamiento de patologías o la evolución a defunción. De igual manera conocer los efectos de la contaminación en patologías respiratorias infecciosas de magnitud epidémica y/o pandémica permitirá considerar este factor para incluir medidas de control ambiental dentro de las medidas de salud pública no farmacológicas en caso de la ocurrencia de otro evento similar por virus respiratorios.

La vigilancia epidemiológica de los casos y defunciones por COVID-19 a través de la vigilancia convencional y a través del SISVER, permitirá continuar con el monitoreo de las tendencias de esta enfermedad (que se espera presente un patrón estacional similar a la influenza y otros virus respiratorios) y evaluar la relación entre las defunciones por esta enfermedad y la exposición a largo plazo tanto a $PM_{2.5}$ como a otros contaminantes atmosféricos.

Este estudio también revela la importancia de contar con un adecuado monitoreo de los contaminantes atmosféricos en todas las entidades federativas y el aumento de cobertura del monitoreo en las ciudades donde ya se realiza, así como asegurar adecuados procesos de validación de los datos para lograr la calidad de los mismos. Esto permitiría conocer las concentraciones con mayor precisión y a su vez, su efecto en la salud de estas poblaciones, para así poder elaborar mejores estrategias y políticas en pro de la salud de todos los mexicanos. Este estudio también puede ser útil para futuros estudios de impacto a la salud que pretendan seleccionar Funciones Concentración-Respuesta (FCR).

LIMITACIONES.

Por la naturaleza del estudio, se presenta susceptibilidad a presentar múltiples sesgos como: falacia ecológica, debido a que la relación entre la exposición-respuesta a nivel del grupo poblacional no refleja necesariamente la relación exposición-respuesta a nivel individual; dificultad para controlar factores de confusión, ya que en este estudio no se incluyeron variables como la movilidad de la población, factores socioeconómicos, la presencia de comorbilidades, la circulación de las variantes de COVID-19 o la vacunación; la multicolinealidad de las variables, ya que no se pueden separar los efectos de otros contaminantes atmosféricos como SO₂, el CO, el NO₂, el O₃ y la PM₁₀; dificultad para determinar la secuencia temporal entre la exposición y la enfermedad debido a que la medición de las variables ocurre al mismo tiempo; y sesgo de selección, debido a la movilidad de la población, ya que se desconoce la migración de la población afectada antes de la medición de la enfermedad, o inmigración a la población estudiada; y al hecho de que las mediciones de las concentraciones de contaminantes, la humedad, temperatura y velocidad del viento se realizan con monitores fijos que no necesariamente reflejan la exposición a nivel individual (91,92).

Otra limitante es que, al tratarse de una enfermedad emergente, la estacionalidad y la dinámica de la transmisión en la población, en comparación con otras enfermedades de transmisión aérea, se están definiendo y estudiando aún. Además, el periodo estudiado comprendió la implementación de medidas de distanciamiento social y restricción de la movilidad, lo que implicó una disminución intrínseca de los contaminantes atmosféricos. Adicionalmente, múltiples factores, desde las características biológicas individuales, los determinantes sociales, factores estructurales del sistema de salud, el acceso a tratamientos específicos contra COVID-19 y factores ambientales están interrelacionados para que una defunción ocurra.

CONSIDERACIONES ÉTICAS

La Declaración Universal de los Derechos Humanos, elaborada por representantes de todas las regiones del mundo, proclamada por la Asamblea General de las Naciones Unidas en París en 1948, indica en su Artículo 25, que "Toda persona tiene derecho a un nivel de vida adecuado que le asegure, así como a su familia, la salud y el bienestar" (93). Por otra parte, de acuerdo con el Artículo 4 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos "Toda persona tiene derecho a la protección de la salud" así como a "un medio ambiente adecuado para su desarrollo y bienestar" (94). Un medio ambiente sano de igual manera es un derecho humano, considerándose un bien jurídico fundamental para la realización de un plan de vida digno, así como una garantía para la realización y vigencia de los demás derechos, incluidos la salud (95).

Esta investigación estuvo guiada por los cuatro principios éticos: respeto a la autonomía, beneficencia, no maleficencia y justicia; con el principal objetivo de generar nuevo conocimiento sobre el impacto de las concentraciones de PM_{2.5} en la Zona Metropolitana del Valle de México sobre las defunciones por COVID-19 (96).

De acuerdo con la Ley General de Salud en Materia de Investigación para la Salud, Título Segundo, De los Aspectos Éticos de la Investigación en Seres Humanos, Capítulo I, Artículo 17, Sección I, esta investigación se clasificó como una Investigación sin riesgo, ya que se trata de una investigación retrospectiva, y no se realizó ninguna intervención o modificación intencionada en las variables fisiológicas, psicológicas y sociales de los individuos que se incluirán en el estudio. Por otra parte, de acuerdo con el Artículo 20, no fue necesario un consentimiento informado, puesto que la información se obtuvo de una fuente de datos secundaria (97).

Los datos personales, de acuerdo con el Artículo 3, Numeral IX de la Ley General de Protección de Datos Personales en Posesión de Sujetos Obligados, hacen referencia a "cualquier información concerniente a una persona física identificada o identificable. Se considera que una persona es identificable cuando su identidad pueda determinarse directa o indirectamente a través de cualquier información". Por otra parte, en el mismo Artículo, Numeral XVII se hace referencia a las fuentes de acceso público como "aquellas bases de datos, sistemas o archivos que por disposición de ley puedan ser consultadas públicamente cuando no exista impedimento por una norma limitativa y sin más exigencia que, en su caso, el pago de una contraprestación, tarifa o contribución. No se considerará fuente de

acceso público cuando la información contenida en la misma sea obtenida o tenga una procedencia ilícita, conforme a las disposiciones establecidas por la presente Ley y demás normativa aplicable" (98). De acuerdo con lo ya mencionado, dado que la fuente de datos de las defunciones por COVID-19 corresponde a una base de datos abiertos, que se encuentra para su consulta pública, los datos personales estuvieron protegidos, de acuerdo con la presente Ley. De igual manera, la información se resguardó en el equipo de cómputo personal de la investigadora, el cual cuenta con contraseña.

Las aportaciones que se esperan con la investigación es incidir sobre la eficacia de medidas preventivas que pretendan modificar la evolución a defunción por la enfermedad por coronavirus (COVID-19) u otras enfermedades respiratorias virales, mediante la formulación de nuevas políticas públicas y la implementación de otras medidas no farmacológicas con el fin de disminuir el número de defunciones por este tipo de padecimientos.

La investigación se desarrolló hasta contar con la aprobación del proyecto por parte de los Comités de Investigación y Ética en Investigación.

Por último, se declara que no existieron conflictos de interés que involucraran a la investigadora o al director y asesores.

RECURSOS

HUMANOS.

- Investigadora principal: Dra. Diana Vidal Aguirre
- Director de tesis: Dr. Alessio David Scorza Gaxiola
- Asesores de tesis:
 - M.C. José Luis Texcalac Sangrador
 - M.C. Alan García Zambrano

MATERIALES.

- Equipo de cómputo propio.
- Recursos digitales disponibles a través de la Biblioteca Digital de la Universidad Nacional Autónoma de México.
- Software: RStudio para lenguaje de programación R.

FINANCIEROS.

- Beca otorgada por la residencia médica en epidemiología de la Dirección General de Epidemiología.

CRONOGRAMA

Año	2021			2022												2023							
Actividad	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	
Búsqueda bibliográfica																							
Redacción del protocolo																							
Envío a comités y envío de correcciones																							
Recolección de la información																							
Análisis de datos																							
Análisis de los resultados																							
Redacción de la tesis																							
Presentación final																							

REFERENCIAS

1. Corella J. P., Sierra M. J., Garralón A., Millán R., Rodríguez-Alonso J., Mata M.P., et al. Recent and historical pollution legacy in high altitude Lake Marboré (Central Pyrenees): A record of mining and smelting since pre-Roman times in the Iberian Peninsula. *Science of The Total Environment*. 10 de enero de 2021;751.
2. Brusseau M. L., Matthias A. D., Comrie A. C., Musil S. A. *Environmental and Pollution Science*. 3ra ed. Academic Press; 2019. Capítulo 17, Atmospheric Pollution; p. 293–309.
3. Davis D. L., Bell M. L., Fletcher T. A look back at the London smog of 1952 and the half century since. *Environmental Health Perspectives*. 1 de diciembre de 2002;110(12):734–5.
4. Organización Mundial de la Salud. WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide [Internet]. Ginebra: Organización Mundial de la Salud; 2021 [consultado el 12 de noviembre de 2021]. p. 1–300. Disponible en: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf>
5. Atkinson R. W., Mills I. C., Walton H. A., Anderson H. R. Fine particle components and health—a systematic review and meta-analysis of epidemiological time series studies of daily mortality and hospital admissions. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*. 17 de septiembre de 2014;25(2):208–14.
6. Kim K. H., Kabir E., Kabir S. A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment International*. 1 de enero de 2015;74:136–43.
7. Abbafati C., Abbas K. M., Abbasi-Kangevari M., Abd-Allah F., Abdelalim A., Abdollahi M., et al. Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet*. 17 de octubre de 2020;396(10258):1223–49.
8. Liu C., Chen R., Sera F., Vicedo-Cabrera A. M., Guo Y., Tong S., et al. Ambient Particulate Air Pollution and Daily Mortality in 652 Cities. *New England Journal of Medicine*. 22 de agosto de 2019;381(8):705–15.
9. Karan A., Ali K., Teelucksingh S., Sakhamuri S. The impact of air pollution on the incidence and mortality of COVID-19. *Global Health Research and Policy*. 1 de septiembre de 2020;5(1):1–3.
10. Mukherjee A., Agrawal M. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. 1ª Edición. Amsterdam: Springer, Cham; 2017. A Global Perspective of Fine Particulate Matter Pollution and Its Health Effects; p. 5–51.
11. Schraufnagel D. E., Balmes J. R., Cowl C. T., de Matteis S., Jung S. H., Mortimer K., et al. Air Pollution and Noncommunicable Diseases: A Review by the Forum of International Respiratory Societies' Environmental Committee, Part 1: The Damaging Effects of Air Pollution. *CHEST*. 1 de febrero de 2019;155(2):409–16.
12. Kutralam-Muniasamy G., Pérez-Guevara F., Roy P. D., Elizalde-Martínez I., Shruti V. C. Impacts of the COVID-19 lockdown on air quality and its association with human mortality trends in megapolis Mexico City. *Air Quality, Atmosphere and Health*. 1 de abril de 2021;14(4):553–62.

13. Morales K. F., Paget J., Spreeuwenberg P. Possible explanations for why some countries were harder hit by the pandemic influenza virus in 2009 - a global mortality impact modeling study. *BMC Infectious Diseases*. 25 de septiembre de 2017;17(1):1–12.
14. Zhou H., Yang J., Zhou C., Chen B., Fang H., Chen S., et al. A Review of SARS-CoV2: Compared With SARS-CoV and MERS-CoV. *Frontiers in Medicine*. 7 de diciembre de 2021;8:2401.
15. Comunian S., Dongo D., Milani C., Palestini P. Air Pollution and COVID-19: The Role of Particulate Matter in the Spread and Increase of COVID-19's Morbidity and Mortality. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 22 de junio de 2020;17(12):4487.
16. Wu X., Nethery R. C., Sabath M. B., Braun D., Dominici F. Air pollution and COVID-19 mortality in the United States: Strengths and limitations of an ecological regression analysis. *Science Advances*. 4 de noviembre de 2020;6(45).
17. Felix-Arellano E. E., Schilman A., Hurtado-Diaz M., Texcalac-Sangrador J. L., Riojas-Rodriguez H. Revisión rápida: contaminación del aire y morbilidad por Covid-19. *Salud Pública de México*. 29 de agosto de 2020;62(5):582–9.
18. Cabrera-Cano A. A., Cruz-de la Cruz J. C., Gloria-Alvarado A. B., Álamo-Hernández U., Riojas-Rodríguez H. Asociación entre mortalidad por Covid-19 y contaminación atmosférica en ciudades mexicanas. *Salud Pública de México*. 19 de mayo de 2021;63(4):470–7.
19. Brusseau M. L., Pepper I. L., Gerba C. P. *Environmental and Pollution Science*. 3ª Edición. Academic Press; 2019. Capítulo 1, The Extent of Global Pollution; p. 3–8.
20. Briggs D. Environmental pollution and the global burden of disease. *British Medical Bulletin*. 1 de diciembre de 2003;68(1):1–24.
21. Echeverri Londoño C. A. *Contaminación Atmosférica*. 20ª Edición. Bogotá: Ediciones de la U; 2019. 1–600 p.
22. Instituto Nacional de Ciencias de la Salud Ambiental. La contaminación del aire y su salud [Internet]. EE. UU: Instituto Nacional de Ciencias de la Salud Ambiental; 2020 [citado el 19 de diciembre de 2021]. Disponible en: <https://www.niehs.nih.gov/health/topics/agents/air-pollution/index.cfm>
23. Mukherjee S., Dasgupta S., Mishra P. K., Chaudhury K. Air pollution-induced epigenetic changes: disease development and a possible link with hypersensitivity pneumonitis. *Environmental Science and Pollution Research*. 8 de septiembre de 2021;28(40):55981–6002.
24. Secretaría de Medio Ambiente. Programa de gestión para mejorar la Calidad de Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México (ProAire ZMVM 2021-2030) [Internet]. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente; 2021 [citado el 14 de marzo de 2022]. Disponible en: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/proaire2021-2030/>
25. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Programa para mejorar la calidad del aire de la zona metropolitana del Valle de México 2002-2010 [Internet]. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; 2002 [citado el 9 de noviembre de 2021]. p. 1–403. Disponible en:

<http://centro.paot.org.mx/index.php/acervo/123-libro-digital/1182-programa-para-mejorar-la-calidad-del-aire-de-la-zona-metropolitana-del-valle-de-mexico-2002-2010>

26. Brusseau M. L., Matthias A. D., Musil S. A., Bohn H. L. Environmental and Pollution Science. 3ª Edición. Academic Press; 2019. Capítulo 4, Physical-Chemical Characteristics of the Atmosphere; p. 47–59.
27. Organización Mundial de la Salud. La contaminación del aire [Internet]. Ginebra: Organización Mundial de la Salud; 2021 [citado el 19 de diciembre de 2021]. Disponible en: https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1
28. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Inventario Nacional de Emisiones 2016 [Internet]. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; 2021 [citado el 26 de septiembre de 2022]. Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/documentos-del-inventario-nacional-de-emisiones>
29. Schraufnagel D. E., Balmes J. R., Cowl C. T., de Matteis S., Jung S. H., Mortimer K., et al. Air Pollution and Noncommunicable Diseases: A Review by the Forum of International Respiratory Societies' Environmental Committee, Part 2: Air Pollution and Organ Systems. CHEST. 1 de febrero de 2019;155(2):417–26.
30. Calvo D., Molina M., Salvachúa J. Contaminación Atmosférica. Ciencias de la Tierra y Medioambientales 2°. 1ª Edición. Madrid: McGraw-Hill Interamericana de España S.L.; 2009; p. 1–432.
31. Aviso por el que se da a conocer la norma ambiental para el Distrito Federal NADF009-AIRE-2017, que establece los requisitos para elaborar el índice de calidad del aire en la Ciudad De México. Gaceta Oficial de la Ciudad de México, núm. 452, (14 de noviembre de 2018).
32. Aviso por el que se da a conocer el Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas en la Ciudad de México. Gaceta Oficial de la Ciudad de México, núm. 100 Bis, (28 de mayo de 2019).
33. Adams K., Greenbaum D. S., Shaikh R., van Erp A. M., Russell A. G. Particulate matter components, sources, and health: Systematic approaches to testing effects. J Air Waste Manage Assoc. 19 de marzo de 2015;65(5):544–58.
34. Instituto Nacional de Ecología. Guía metodológica para la estimación de emisiones de PM2.5. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; 2011. p. 1–106.
35. Nozza E., Valentini S., Melzi G., Vecchi R., Corsini E. Advances on the immunotoxicity of outdoor particulate matter: A focus on physical and chemical properties and respiratory defence mechanisms. Science of The Total Environment. 1 de agosto de 2021;780:2–11.
36. Feng S., Gao D., Liao F., Zhou F., Wang X.. The health effects of ambient PM2.5 and potential mechanisms. Ecotoxicology and Environmental Safety. 1 de junio de 2016;128:67–74.
37. Alfaro-Moreno E., Nawrot T. S., Nemmar A., Nemery B.. Particulate matter in the environment: Pulmonary and cardiovascular effects. Current Opinion in Pulmonary Medicine. 1 de marzo de 2007;13(2):98–106.
38. Croft D. P., Zhang W., Lin S., Thurston S. W., Hopke P. K., Masiol M., et al. The association between respiratory infection and air pollution in the setting of air

- quality policy and economic change. *Ann Am Thorac Soc.* 1 de marzo de 2019;16(3):321–30.
39. Elder A., Gelein R., Silva V., Feikert T., Opanashuk L., Carter J., et al. Translocation of Inhaled Ultrafine Manganese Oxide Particles to the Central Nervous System. *Environmental Health Perspectives.* 1 de agosto de 2006;114(8):1172.
 40. Gao D., Ripley S., Weichenthal S., Godri Pollitt K. J. Ambient particulate matter oxidative potential: Chemical determinants, associated health effects, and strategies for risk management. *Free Radical Biology and Medicine.* 1 de mayo de 2020;151:7–25.
 41. Conceptos y guía de análisis de impacto en salud para la Región de las Américas. Washington, DC: OPS, 2013.
 42. Trejo-González A. G., Riojas-Rodríguez H., Texcalac-Sangrador J. L., Guerrero-López C. M., Cervantes-Martínez K., Hurtado-Díaz M., et al. Quantifying health impacts and economic costs of PM_{2.5} exposure in Mexican cities of the National Urban System. *International Journal of Public Health.* 5 de marzo de 2019;64(4):561–72.
 43. Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental. Estimación de impactos en salud por contaminación atmosférica en la región centro del país y alternativas de control. Ciudad de México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. diciembre 2016. 73 pp.
 44. Agencia Europea de Medio Ambiente. Normas de Calidad del Aire [Internet]. Agencia Europea de Medio Ambiente; 2021 [citado el 4 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality-concentrations/air-quality-standards>
 45. Parlamento Europeo y del Consejo. Directiva 2008/50/EC del Parlamento Europeo y del Consejo del 21 de mayo de 2008 sobre la calidad del aire ambiente y un aire más limpio para Europa [Internet]. Estrasburgo: Parlamento Europeo y del Consejo; 2008 [citado el 4 de mayo de 2022]. p. 1–56. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1486474738782&uri=CELEX:02008L0050-20150918>
 46. Agencia de Protección Ambiental. Estándares Nacionales de Calidad del Aire Ambiental (NAAQS) para PM | [Internet]. EE. UU.: Agencia de Protección Ambiental; 2020 [citado el 12 de noviembre de 2021]. Disponible en: <https://www.epa.gov/pm-pollution/national-air-quality-standards-naaqs-pm>
 47. Wang Z., Tan Y., Guo M., Cheng M., Gu Y., Chen S., et al. Prospect of China's ambient air quality standards. *Journal of Environmental Sciences.* 4 de abril de 2022.
 48. Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente y criterios para su evaluación. Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014. *Diario Oficial de la Federación,* 20 de agosto de 2014.
 49. Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5}. Valores normados para la concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente,

- como medida de protección a la salud de la población. Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021. Diario Oficial de la Federación, 27 de octubre de 2021.
50. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Informe Nacional de la Calidad del Aire 2019, México. Ciudad de México: Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos. Ciudad de México. 343 pp.
 51. Secretaría del Medio Ambiente. Glosario definición [Internet]. Ciudad de México: Secretaría del Medio Ambiente, 2022 [citado el 19 de junio de 2022. Disponible en: <http://www.sadsma.cdmx.gob.mx:9000/datos/glosario-definicion/Contingencia%20Ambiental>
 52. Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios. Programa para Contingencias Ambientales Atmosféricas [Internet]. Ciudad de México: Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios; 31 de diciembre de 2017 [citado el 19 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/9-programa-para-contingencias-ambientales-atmosfericas>
 53. Comisión Ambiental de la Megalópolis. Se activa Contingencia Ambiental Atmosférica extraordinaria por partículas (PM2.5) y ozono en la ZMVM [Internet]. Ciudad de México: Comisión Ambiental de la Megalópolis, 14 de mayo de 2019 [citado el 8 de noviembre de 2021]. Disponible en: <https://www.gob.mx/comisionambiental/prensa/se-activa-contingencia-ambiental-atmosferica-extraordinaria-por-particulas-pm2-5-y-ozono-en-la-zmvm#:~:text=Se activa Contingencia Ambiental Atmosférica Extraordinaria en el Valle de,Calidad del Aire por ozono>
 54. Secretaría de Salud de la Ciudad de México. Secretaría de Salud de la Ciudad de México mantiene alerta por contingencia ambiental [Internet]. Ciudad de México: Secretaría de Salud de la Ciudad de México, 14 de mayo de 2019 [citado el 9 de noviembre de 2021]. Disponible en: <https://www.salud.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/14052019-secretaria-de-salud-de-la-ciudad-de-mexico-mantiene-alerta-por-contingencia-ambiental>
 55. Comisión Ambiental de la Megalópolis. Se suspende la Contingencia Ambiental Atmosférica Extraordinaria en la ZMVM [Internet]. Ciudad de México: Comisión Ambiental de la Megalópolis, 17 de mayo de 2019 [citado el 9 de noviembre de 2021]. Disponible en: <https://www.gob.mx/comisionambiental/prensa/se-suspende-la-contingencia-ambiental-atmosferica-extraordinaria-en-la-zmvm>
 56. Aviso por el que se da a conocer el Programa para Contingencias Ambientales Atmosféricas en la Ciudad de México. Gaceta Oficial de la Ciudad de México, núm. 44, (6 de abril de 2016).
 57. Comisión Ambiental de la Megalópolis. Consulta el Nuevo Programa para Prevenir y responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas [Internet]. Ciudad de México: Comisión Ambiental de la Megalópolis, 22 de mayo de 2019 [citado el 9 de noviembre de 2021]. Disponible en: <https://www.gob.mx/comisionambiental/prensa/consulta-el-nuevo-programa-para-prevenir-y-responder-a-contingencias-ambientales-atmosfericas>
 58. Organización Meteorológica Mundial. OMM Aire Calidad y Clima Boletín - No. 1, septiembre 2021 [Internet]. Ginebra: Organización Meteorológica Mundial,

- septiembre de 2021 [citado el 7 de mayo de 2022]. Disponible en: https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21942#.Ynh2iurMLIW
59. Sokhi R. S., Singh V., Querol X., Finardi S., Targino A. C., Andrade M. de F., et al. A global observational analysis to understand changes in air quality during exceptionally low anthropogenic emission conditions. *Environment International*. 1 de diciembre de 2021;157:106818.
 60. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire, SINAICA [Internet]. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. [citado el 22 de septiembre de 2022]. Disponible en: <https://sinaica.inecc.gob.mx/>
 61. Comisión Ambiental de la Megalópolis. ¿Cómo se monitorea la calidad del aire en la ZMVM? [Internet]. Ciudad de México: Comisión Ambiental de la Megalópolis; 28 de diciembre de 2018 [citado el 19 de diciembre de 2021]. Disponible en: <https://www.gob.mx/comisionambiental/es/articulos/como-se-monitorea-la-calidad-del-aire-en-la-zmvm?idiom=es>
 62. Dirección de Monitoreo Atmosférico. El monitoreo de la calidad del aire [Internet]. Ciudad de México: Dirección de Monitoreo Atmosférico. [citado el 20 de diciembre de 2021]. Disponible en: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnml=%27>
 63. Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire. Norma Oficial Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012. *Diario Oficial de la Federación*, 16 de julio de 2012.
 64. Harrison A. G., Lin T., Wang P. Mechanisms of SARS-CoV-2 Transmission and Pathogenesis. *Trends in Immunology*. 1 de diciembre de 2020;41(12):1100–15.
 65. Organización Mundial de la Salud. Cronología de la respuesta de la OMS a la COVID-19 [Internet]. Ginebra: Organización Mundial de la Salud, 29 de junio de 2020 [actualizado al 29 de enero de 2021, citado el 26 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news/item/29-06-2020-covidtimeline>
 66. Secretaría de Salud. Informes Epidemiológicos de la situación de COVID-19 en México 2021 [Internet]. Gobierno de México. 5 de noviembre de 2021 [consultado el 26 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://www.gob.mx/salud/documentos/informes-epidemiologicos-de-la-situacion-de-covid19-en-mexico-2021>
 67. Secretaría de Salud. Informe Técnico Diario COVID-19 31 de diciembre de 2021 [Internet]. Ciudad de México: Gobierno de México. 31 de diciembre de 2021 [consultado el 12 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://www.gob.mx/salud/documentos/informacion-internacional-y-nacional-sobre-nuevo-coronavirus-2021>
 68. Grupo de trabajo interinstitucional para el análisis del exceso de mortalidad por todas las causas. Boletín estadístico del exceso de mortalidad por todas las causas durante la emergencia por COVID-19 [Internet]. Ciudad de México; 2022. 43 p. Reporte No. 29 [consultado el 27 de septiembre de 2022]. Disponible en: https://coronavirus.gob.mx/wp-content/uploads/2022/02/Boleti%CC%81n_XXIX_Exceso_Mortalidad_SE52_210122.pdf

69. Yadav R., Bajpai P. K., Srivastava D. K., Kumar R. Epidemiological characteristics, reinfection possibilities and vaccine development of SARS CoV2: A global review. *J Family Med Prim Care* 2021;10(3):1095-101.
70. Jackson C. B., Farzan M., Chen B., Choe H. Mechanisms of SARS-CoV-2 entry into cells. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*. 1 de enero de 2022;23(1):3.
71. Secretaría de Salud. Lineamiento Estandarizado Para La Vigilancia Epidemiológica Y Por Laboratorio De La Enfermedad Respiratoria Viral. Ciudad de México: Secretaría de Salud; marzo de 2022. 134 p.
72. Frontera A., Cianfanelli L., Vlachos K., Landoni G., Cremona G. Severe air pollution links to higher mortality in COVID-19 patients: The “double-hit” hypothesis. *Journal of Infection*. 1 de agosto de 2020;81(2):255–9.
73. Pozzer A., Dominici F., Haines A., Witt C., Münzel T., Lelieveld J. Regional and global contributions of air pollution to risk of death from COVID-19. *Cardiovascular Research*. 1 de diciembre de 2020;116(14):2247–53.
74. Gold M. S., Sehayek D., Gabrielli S., Zhang X., McCusker C., Ben-Shoshan M. COVID-19 and comorbidities: a systematic review and meta-analysis. *Postgraduate Medicine*. 23 de junio de 2020;132(8),749–55.
75. Li J., Huang D. Q., Zou B., et al. Epidemiology of COVID-19: A systematic review and meta-analysis of clinical characteristics, risk factors, and outcomes. *Journal of Medical Virology*. 1 de marzo de 2021;93(3):1449–58.
76. Fang X., Li S., Yu H., Wang P., Zhang Y., Chen Z., Li W, Jia H, Ma X. Epidemiological, comorbidity factors with severity and prognosis of COVID-19: a systematic review and meta-analysis. *Aging*. 13 de julio de 2020;12(13):12493–503
77. Zheng Z., Peng F., Xu B., Zhao J., Liu H., Peng J., et al. Risk factors of critical & mortal COVID-19 cases: A systematic literature review and meta-analysis. *Journal of Infection*. 1 de agosto de 2020;81(2):16–25.
78. Ng W H., Tipih T., Makoah N. A., Vermeulen J. G., Goedhals D., Sempa J. B., et al. Comorbidities in SARS-CoV-2 patients: A systematic review and meta-analysis. *mBio*. 1 de enero de 2021;12(1):1–12.
79. Mahamat-Saleh Y., Fiolet T., Rebeaud M. E., et al. Diabetes, hypertension, body mass index, smoking and COVID-19-related mortality: a systematic review and meta-analysis of observational studies. *BMJ Open*. 1 de octubre de 2021;11(10):e052777.
80. Zhou Y., Yang Q., Chi J., Dong B., Lv W., Shen L., et al. Comorbidities and the risk of severe or fatal outcomes associated with coronavirus disease 2019: A systematic review and meta-analysis. *International Journal of Infectious Diseases*. 1 de octubre de 2020;99:47–56.
81. Naciones Unidas. La economía circular: un modelo económico que lleva al crecimiento y al empleo sin comprometer el medio ambiente [Internet]. Ginebra: ONU. 2021 [consultado el 27 de agosto de 2022]. Disponible en: <https://news.un.org/es/story/2021/03/1490082>
82. Gómez-López C. S., Barrón-Arreola K. S., Moreno-Moreno L. Crecimiento económico y medio ambiente en México. *Trimest Econ*. 2011;78(311):547–82.
83. Muñoz Guzmán, M. A. Economía vs. Equilibrio Ambiental. 1ª Edición. Veracruz: Universidad Cristóbal Colón; 2010. Modelo Económico Mundial y la Conservación del Medio Ambiente; p. 1–30.

84. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Características de las Defunciones Registradas en México Durante 2020, Preliminar. Ciudad de México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía; 29 de julio de 2021. 92 p. Comunicado de Prensa núm. 402/21.
85. A/RES/71/313 Labor de la Comisión de Estadística en relación con la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Ginebra: Asamblea General Naciones Unidas; 10 de julio de 2017.
86. Texcalac-Sangrador J. L., Hurtado-Díaz M., Félix-Arellano E. E., Guerrero-López C. M., Riojas-Rodríguez H. Health and Economic Impacts Assessment of O₃ Exposure in Mexico. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2021;18:11646.
87. de Mesnard L. Pollution models and inverse distance weighting: Some critical remarks. *Comput Geosci.* 1 de marzo de 2013;52:459–69.
88. Shukla K, Kumar P, Mann GS, Khare M. Mapping spatial distribution of particulate matter using Kriging and Inverse Distance Weighting at supersites of megacity Delhi. *Sustain Cities Soc.* 1 de marzo de 2020;54:101997.
89. Bonilla JA, Lopez-Feldman A, Pereda PC, Rivera NM, Ruiz-Tagle JC. Association between long-term air pollution exposure and COVID-19 mortality in Latin America. *PLoS One.* 1 de enero de 2023;18(1):e0280355.
90. López-Feldman A., Heres D., Marquez-Padilla F. Air pollution exposure and COVID-19: A look at mortality in Mexico City using individual-level data. *Science of The Total Environment.* 20 de febrero de 2021;756:143929.
91. Palacios-Nava, M. E. *Epidemiología y Estadística en Salud Pública.* 1ª Edición. Ciudad de México: McGraw-Hill; 2011. Capítulo 6, Falacia ecológica y sesgos; p. 78–9.
92. Borja-Aburto VH. Estudios ecológicos. *Salud Publica Mex.* 2000;42(6):533–8.
93. ONU: Asamblea General. Declaración Universal de Derechos Humanos. 10 diciembre 1948, 217 A (III).
94. Gobierno de México. Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Artículo 4º [Internet]. Gobierno de México. 2015 [consultado el 20 de octubre de 2022]. Disponible en: <https://www.gob.mx/salud/articulos/constitucion-politica-de-los-estados-unidos-mexicano-articulo-4>
95. Comisión Nacional de los Derechos Humanos. *El Derecho Humano al Medio Ambiente Sano para el Desarrollo y Bienestar.* Ciudad de México: Comisión Nacional de los Derechos Humanos; diciembre 2014. 21 p.
96. Comisión Nacional de Bioética. *Guía nacional para la integración y el funcionamiento de los Comités de Ética en Investigación.* Ciudad de México: Secretaría de Salud; 2018. 60 p.
97. Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Investigación para la Salud. *Diario Oficial de la Federación.* Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, (2 de abril de 2014).
98. Ley General de Protección de Datos Personales en Posesión de Sujetos Obligados. *Diario Oficial de la Federación.* Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, (26 de enero de 2017).

ANEXOS

Anexo 1. Mortalidad cruda y ajustada por COVID-19 en México, por entidad federativa durante 2020.

No.	Entidad	Población	Número de defunciones	Mortalidad por 10,000 hab.	Mortalidad ajustada por 1,000,000 hab.
1	Aguascalientes	1,434,635	1,767	12.31672167	13.82712568
2	Baja California	3,634,868	7,312	20.11627382	57.21785116
3	Baja California Sur	804,708	918	11.40786472	7.183532189
4	Campeche	1,000,617	1,055	10.54349466	8.255584379
5	Coahuila	3,218,720	5,112	15.88208977	40.00241454
6	Colima	785,153	922	11.74293418	7.214832983
7	Chiapas	5,730,367	1,274	2.223243293	9.969302842
8	Chihuahua	3,801,487	5,961	15.680706	46.64600804
9	Ciudad de México	9,018,645	30,637	33.97073507	239.7406053
10	Durango	1,868,996	1,894	10.13378306	14.82092589
11	Guanajuato	6,228,175	6,989	11.22158578	54.69031206
12	Guerrero	3,657,048	2,971	8.124038842	23.24866463
13	Hidalgo	3,086,414	4,081	13.22246465	31.93463493
14	Jalisco	8,409,693	7,922	9.420082279	61.99122222
15	México	17,427,790	20,203	11.592405	158.0924845
16	Michoacán	4,825,401	3,412	7.070914935	26.69957716
17	Morelos	2,044,058	2,004	9.804027087	15.68169772
18	Nayarit	1,288,571	1,255	9.739471089	9.820624071
19	Nuevo León	5,610,153	7,199	12.8320921	56.33360374
20	Oaxaca	4,143,593	2,540	6.129945678	19.8760041
21	Puebla	6,604,451	7,629	11.55130078	59.69843907
22	Querétaro	2,279,637	2,767	12.13789739	21.65232415
23	Quintana Roo	1,723,259	2,171	12.59822232	16.98850586
24	San Luis Potosí	2,866,142	3,759	13.11519108	29.41492102
25	Sinaloa	3,156,674	4,975	15.76025906	38.93036235
26	Sonora	3,074,745	5,737	18.65845786	44.89316358
27	Tabasco	2,572,287	3,595	13.97588994	28.13158847
28	Tamaulipas	3,650,602	4,009	10.98175041	31.37122064
29	Tlaxcala	1,380,011	1,618	11.72454422	12.66117111
30	Veracruz	8,539,862	7,567	8.860798922	59.21327677
31	Yucatán	2,259,098	3,032	13.42128584	23.72600174
32	Zacatecas	1,666,426	2,097	12.5838171	16.40944118

Anexo 2. Mortalidad cruda y ajustada por COVID-19 en México, por entidad federativa durante 2021.

No.	Entidad	Población	Número de defunciones	Mortalidad por 10,000 hab.	Mortalidad ajustada por 1,000,000 hab.
1	Aguascalientes	1,453,452	1,418	9.756084136	10.99459707
2	Baja California	3,690,160	3,789	10.26784746	29.37836975
3	Baja California Sur	821,059	1,510	18.39088299	11.70792777
4	Campeche	1,017,011	1,030	10.1277174	7.986202385
5	Coahuila	3,261,259	2,791	8.558044608	21.64028239
6	Colima	797,245	1,308	16.40649988	10.14170167
7	Chiapas	5,812,375	866	1.489924515	6.714612879
8	Chihuahua	3,836,506	2,963	7.723173116	22.97390065
9	Ciudad de México	9,003,827	22,986	25.52914444	178.2241243
10	Durango	1,884,622	1,291	6.850180036	10.00989056
11	Guanajuato	6,280,645	6,577	10.4718544	50.99539135
12	Guerrero	3,668,973	3,252	8.863515758	25.21468947
13	Hidalgo	3,121,355	3,714	11.89867862	28.79685015
14	Jalisco	8,490,806	9,810	11.55367347	76.06276253
15	México	17,603,429	13,158	7.474680075	102.0217971
16	Michoacán	4,857,777	4,708	9.691675843	36.50392314
17	Morelos	2,065,014	2,927	14.17423804	22.69477124
18	Nayarit	1,306,145	1,788	13.68913865	13.86342705
19	Nuevo León	5,685,888	6,723	11.8240106	52.12741615
20	Oaxaca	4,165,619	2,994	7.187407202	23.21426208
21	Puebla	6,664,764	8,271	12.41004183	64.12998051
22	Querétaro	2,319,537	3,123	13.46389387	24.21447578
23	Quintana Roo	1,761,389	1,895	10.75855475	14.69306167
24	San Luis Potosí	2,885,705	3,114	10.79112383	24.14469343
25	Sinaloa	3,181,609	4,231	13.29830284	32.80545854
26	Sonora	3,111,119	3,679	11.82532716	28.52547435
27	Tabasco	2,599,658	2,335	8.981950703	18.10464327
28	Tamaulipas	3,679,623	3,370	9.158546949	26.12961363
29	Tlaxcala	1,395,545	1,197	8.577294175	9.281052675
30	Veracruz	8,588,469	8,037	9.357896035	62.31563939
31	Yucatán	2,283,943	3,486	15.26307793	27.0290306
32	Zacatecas	1,677,911	1,300	7.74772917	10.07967291

Anexo 3. Mortalidad cruda y ajustada por COVID-19 en México, por municipio durante 2020.

No.	Entidad	Municipio	Población municipio	Población entidad	Número de defunciones	Mortalidad por 100,000 hab.	Mortalidad ajustada por 1,000,000 hab.
1	Ciudad de México	Iztapalapa	1,815,551	9,018,645	4,766	262.5098386	528.460761
2	Ciudad de México	Gustavo A. Madero	1,176,967	9,018,645	3,757	319.2103092	416.5814266
3	Estado de México	Ecatepec de Morelos	1,707,754	17,427,790	3,814	223.3342741	218.8458778
4	Ciudad de México	Álvaro Obregón	755,537	9,018,645	1,945	257.4327928	215.6643265
5	Ciudad de México	Cuauhtémoc	548,606	9,018,645	1,631	297.2989723	180.8475663
6	Ciudad de México	Coyoacán	621,952	9,018,645	1,587	255.1643857	175.9687847
7	Ciudad de México	Azcapotzalco	408,441	9,018,645	1,575	385.6126099	174.6382078
8	Ciudad de México	Iztacalco	393,821	9,018,645	1,562	396.6268939	173.1967496
9	Ciudad de México	Venustiano Carranza	433,231	9,018,645	1,378	318.0751147	152.7945717
10	Estado de México	Nezahualcóyotl	1,135,786	17,427,790	2,647	233.0544662	151.8838591
11	Ciudad de México	Tlalpan	682,234	9,018,645	1,227	179.8503153	136.05148
12	Ciudad de México	Miguel Hidalgo	379,624	9,018,645	905	238.3937791	100.3476686
13	Estado de México	Naucalpan de Juárez	910,187	17,427,790	1,688	185.4563952	96.85680169
14	Estado de México	Tlalnepantla de Baz	756,537	17,427,790	1,655	218.7599549	94.96327417
15	Ciudad de México	Benito Juárez	433,708	9,018,645	849	195.7538252	94.13831013
16	Ciudad de México	Xochimilco	418,060	9,018,645	834	199.4928958	92.47508911
17	Ciudad de México	Tláhuac	366,586	9,018,645	669	182.4946943	74.17965781
18	Estado de México	Tultitlán	556,493	17,427,790	1,023	183.8298056	58.69935316
19	Estado de México	Chalco	397,344	17,427,790	986	248.1477007	56.57630715
20	Ciudad de México	La Magdalena Contreras	245,147	9,018,645	509	207.6305237	56.43863352
21	Estado de México	Chimalhuacán	720,207	17,427,790	922	128.0187502	52.90401135
22	Estado de México	Cuautitlán Izcalli	577,190	17,427,790	830	143.8001351	47.62508614
23	Estado de México	Tecámac	500,585	17,427,790	798	159.4134862	45.78893824
24	Estado de México	Atizapán de Zaragoza	557,108	17,427,790	750	134.6238072	43.03471639
25	Ciudad de México	Cuajimalpa de Morelos	199,809	9,018,645	376	188.1797116	41.69140708
26	Estado de México	Ixtapaluca	551,034	17,427,790	650	117.9600533	37.29675421
27	Estado de México	Coacalco de Berriozábal	310,743	17,427,790	577	185.6839897	33.10804181
28	Estado de México	Nicolás Romero	441,064	17,427,790	560	126.9657011	32.13258824
29	Estado de México	Texcoco	262,015	17,427,790	482	183.9589336	27.65697773
30	Estado de México	La Paz	309,596	17,427,790	456	147.2887247	26.16510757
31	Estado de México	Cuautitlán	175,004	17,427,790	434	247.9943316	24.90275589
32	Ciudad de México	Milpa Alta	139,371	9,018,645	209	149.9594607	23.17421298
33	Estado de México	Zumpango	217,166	17,427,790	349	160.7065563	20.02548803
34	Estado de México	Valle de Chalco Solidaridad	419700	17427790	320	76.24493686	18.36147899
35	Estado de México	Huixquilucan	290231	17427790	277	95.44121751	15.89415525
36	Estado de México	Chicoloapan	226911	17427790	255	112.3788622	14.63180357
37	Estado de México	Tultepec	160943	17427790	217	134.8303437	12.45137794
38	Estado de México	Acolman	186256	17427790	135	72.48088652	7.746248951
39	Estado de México	Huehuetoca	147326	17427790	121	82.13078479	6.942934245
40	Estado de México	Teoloyucan	69466	17427790	112	161.2299542	6.426517648
41	Estado de México	Teotihuacán	60992	17427790	102	167.2350472	5.852721429
42	Estado de México	Melchor Ocampo	61172	17427790	96	156.9345452	5.508443698
43	Estado de México	Tepotzotlán	104335	17427790	94	90.09440744	5.393684455
44	Estado de México	Coyotepec	44201	17427790	85	192.3033416	4.877267858
45	Estado de México	Atenco	70016	17427790	72	102.833638	4.131332774
46	Estado de México	Tezoyuca	46527	17427790	67	144.0024072	3.844434664
47	Estado de México	Apaxco	31576	17427790	66	209.0195085	3.787055043
48	Estado de México	Jaltenco	29179	17427790	56	191.9188457	3.213258824

49	Estado de México	Amecameca	54548	17427790	53	97.16213243	3.041119958
50	Estado de México	Hueypoxtla	46742	17427790	50	106.9701767	2.868981093
51	Estado de México	Temascalapa	41685	17427790	50	119.9472232	2.868981093
52	Estado de México	Nextlalpan	43640	17427790	48	109.9908341	2.754221849
53	Estado de México	Tequixquiac	39658	17427790	45	113.47017	2.582082984
54	Estado de México	Otumba	38186	17427790	42	109.9879537	2.409944118
55	Estado de México	Chiautla	31803	17427790	32	100.6194384	1.836147899
56	Estado de México	Tlalmanalco	51370	17427790	31	60.34650574	1.778768278
57	Estado de México	San Martín de las Pirámides	29145	17427790	29	99.50248756	1.664009034
58	Estado de México	Chiconcuac	27570	17427790	28	101.5596663	1.606629412
59	Estado de México	Ozumba	31154	17427790	25	80.2465173	1.434490546
60	Estado de México	Axapusco	30040	17427790	23	76.56458056	1.319731303
61	Estado de México	Jilotzingo	20713	17427790	22	106.2134891	1.262351681
62	Estado de México	Tepetlaoxtoc	33108	17427790	18	54.36752447	1.032833193
63	Estado de México	Atlautla	32674	17427790	17	52.02913632	0.975453572
64	Estado de México	Villa del Carbón	50614	17427790	16	31.61180701	0.91807395
65	Estado de México	Tonanitla	10960	17427790	16	145.9854015	0.91807395
66	Estado de México	Tepetlixpa	21137	17427790	14	66.23456498	0.803314706
67	Estado de México	Juchitepec	27241	17427790	13	47.72218347	0.745935084
68	Estado de México	Cocotitlán	15387	17427790	10	64.98992656	0.573796219
69	Estado de México	Nopaltepec	9753	17427790	8	82.02604327	0.459036975
70	Estado de México	Tenango del Aire	13344	17427790	8	59.95203837	0.459036975
71	Estado de México	Temamatla	13690	17427790	7	51.13221329	0.401657353
72	Estado de México	Ayapango	11081	17427790	5	45.12228138	0.286898109
73	Estado de México	Ecatzingo	10090	17427790	5	49.55401388	0.286898109
74	Estado de México	Isidro Fabela	12512	17427790	4	31.96930946	0.229518487
75	Estado de México	Papalotla	4367	17427790	2	45.79803068	0.114759244

Anexo 4. Mortalidad cruda y ajustada por COVID-19 en México, por municipio durante 2021.

No.	Entidad	Municipio	Población municipio	Población entidad	Número de defunciones	Mortalidad por 100,000 hab.	Mortalidad ajustada por 1,000,000 hab.
1	Ciudad de México	Iztapalapa	1,807,133	9,003,827	3357	185.763859	372.84146
2	Ciudad de México	Gustavo A. Madero	1,173,555	9,003,827	2543	216.692017	282.435458
3	Ciudad de México	Álvaro Obregón	755,046	9,003,827	1448	191.776395	160.820504
4	Estado de México	Ecatepec de Morelos	1,716,891	17,603,429	2818	164.133891	160.082448
5	Ciudad de México	Azcapotzalco	407,280	9,003,827	1165	286.043999	129.389425
6	Ciudad de México	Coyoacán	620,486	9,003,827	1140	183.72695	126.612828
7	Ciudad de México	Cuauhtémoc	549,396	9,003,827	1060	192.939155	117.727717
8	Ciudad de México	Iztacalco	393,275	9,003,827	1051	267.243023	116.728142
9	Ciudad de México	Tlalpan	682,121	9,003,827	1027	150.559798	114.062609
10	Ciudad de México	Venustiano Carranza	432,392	9,003,827	965	223.177117	107.176648
11	Estado de México	Nezahualcóyotl	1,141,770	17,603,429	1672	146.4393	94.9814948
12	Estado de México	Naucalpan de Juárez	917,312	17,603,429	1383	150.766588	78.5642388
13	Ciudad de México	Benito Juárez	436,737	9,003,827	652	149.288931	72.4136526
14	Ciudad de México	Xochimilco	416,419	9,003,827	645	154.892068	71.6362054
15	Estado de México	Tlalnepantla de Baz	763,728	17,603,429	1211	158.564306	68.7934152
16	Ciudad de México	Miguel Hidalgo	380,465	9,003,827	574	150.868017	63.7506696
17	Ciudad de México	Tláhuac	365,386	9,003,827	568	155.452042	63.0842863
18	Estado de México	Chalco	405,488	17,603,429	903	222.69463	51.296824
19	Estado de México	Cuautitlán Izcalli	581,688	17,603,429	749	128.763186	42.5485285
20	Estado de México	Tultitlán	560,120	17,603,429	700	124.97322	39.7649799
21	Ciudad de México	La Magdalena Contreras	244,769	9,003,827	324	132.369704	35.9846985
22	Estado de México	Tecámac	510,768	17,603,429	566	110.81352	32.1528266
23	Estado de México	Atizapán de Zaragoza	560,994	17,603,429	548	97.6837542	31.1302985
24	Estado de México	Chimalhuacán	726,430	17,603,429	512	70.4816706	29.0852424
25	Ciudad de México	Cuajimalpa de Morelos	199,926	9,003,827	244	122.045157	27.0995878
26	Estado de México	Coacalco de Berriozábal	312,389	17,603,429	467	149.4931	26.5289223
27	Estado de México	Texcoco	264,421	17,603,429	457	172.830448	25.9608512
28	Estado de México	Nicolás Romero	447,017	17,603,429	413	92.3902223	23.4613381
29	Ciudad de México	Milpa Alta	139,441	9,003,827	188	134.824047	20.8800102
30	Estado de México	Ixtapaluca	557,092	17,603,429	364	65.3392976	20.6777895
31	Estado de México	La Paz	312,970	17,603,429	355	113.429402	20.1665255
32	Estado de México	Cuautitlán	177,731	17,603,429	339	190.737688	19.2576117
33	Estado de México	Valle de Chalco Solidaridad	423921	17,603,429	254	59.9168241	14.429007
34	Estado de México	Huixquilucan	293667	17,603,429	209	71.1690452	11.8726868
35	Estado de México	Zumpango	220996	17,603,429	193	87.3318974	10.963773
36	Estado de México	Tultepec	162956	17,603,429	178	109.23194	10.1116663
37	Estado de México	Chicoloapan	230653	17,603,429	143	61.9978929	8.12341732
38	Estado de México	Huehuetoca	150654	17,603,429	102	67.704807	5.79432564
39	Estado de México	Teoloyucan	69423	17,603,429	86	123.878254	4.88541181
40	Estado de México	Acolman	190073	17,603,429	65	34.1973873	3.69246242
41	Estado de México	Teotihuacán	61609	17,603,429	59	95.7652291	3.35161973
42	Estado de México	Melchor Ocampo	62105	17,603,429	55	88.5596973	3.12439128
43	Estado de México	Tepotzotlán	105766	17,603,429	55	52.0015884	3.12439128
44	Estado de México	Coyotepec	44468	17,603,429	49	110.191598	2.78354859
45	Estado de México	Apaxco	31891	17,603,429	44	137.96996	2.49951302
46	Estado de México	Nextlalpan	44432	17,603,429	44	99.0277278	2.49951302

47	Estado de México	Atenco	71122	17,603,429	40	56.241388	2.27228456
48	Estado de México	Tlalmanalco	51804	17,603,429	34	65.6319975	1.93144188
49	Estado de México	Hueypoxtla	47272	17,603,429	31	65.577932	1.76102054
50	Estado de México	Amecameca	54970	17,603,429	30	54.5752228	1.70421342
51	Estado de México	Temascalapa	42107	17,603,429	29	68.872159	1.64740631
52	Estado de México	Tequixquiac	40100	17,603,429	26	64.8379052	1.47698497
53	Estado de México	Tezoyuca	47398	17,603,429	25	52.7448416	1.42017785
54	Estado de México	Jaltenco	29260	17,603,429	21	71.7703349	1.1929494
55	Estado de México	Tepetlaoxtoc	33490	17,603,429	16	47.7754554	0.90891383
56	Estado de México	Chiautla	32263	17,603,429	15	46.4928866	0.85210671
57	Estado de México	Chiconcuac	27952	17,603,429	14	50.0858615	0.7952996
58	Estado de México	Jilotzingo	20933	17,603,429	13	62.1028997	0.73849248
59	Estado de México	Atlautla	33040	17,603,429	12	36.3196126	0.68168537
60	Estado de México	San Martín de las Pirámides	29497	17,603,429	12	40.6821033	0.68168537
61	Estado de México	Juchitepec	27540	17,603,429	11	39.9419027	0.62487826
62	Estado de México	Tepetlixpa	21345	17,603,429	11	51.5343172	0.62487826
63	Estado de México	Axapusco	30436	17,603,429	10	32.8558286	0.56807114
64	Estado de México	Otumba	38578	17,603,429	10	25.9215097	0.56807114
65	Estado de México	Villa del Carbón	51111	17,603,429	10	19.5652599	0.56807114
66	Estado de México	Cocotitlán	15587	17,603,429	9	57.7404247	0.51126403
67	Estado de México	Ozumba	31481	17,603,429	8	25.4121534	0.45445691
68	Estado de México	Temamatla	13843	17,603,429	8	57.7909413	0.45445691
69	Estado de México	Tonanitla	11014	17,603,429	8	72.6348284	0.45445691
70	Estado de México	Papalotla	4397	17,603,429	7	159.199454	0.3976498
71	Estado de México	Isidro Fabela	12669	17,603,429	5	39.4664141	0.28403557
72	Estado de México	Nopaltepec	9832	17,603,429	4	40.6834825	0.22722846
73	Estado de México	Ecatzingo	10171	17,603,429	3	29.4956248	0.17042134
74	Estado de México	Tenango del Aire	13540	17,603,429	3	22.1565731	0.17042134
75	Estado de México	Ayapango	11268	17,603,429	1	8.87468939	0.05680711

Anexo 5. Dictamen de aprobación del Comité de Investigación.



SALUD
SECRETARÍA DE SALUD

SUBSECRETARÍA DE PREVENCIÓN
Y PROMOCIÓN DE LA SALUD

DIRECCIÓN GENERAL
DE EPIDEMIOLOGÍA



2022 Flores
Año de
Mayores
SECRETARÍA DE LA ECONOMÍA

Ciudad de México, a 24 de octubre de 2022

Oficio No. CI - 19-2022.

Asunto: Dictamen Aprobado

Dra. Diana Vidal Aguirre
Francisco de P. Miranda 157 - 7o Piso
Colonia U. H. Lomas de Plateros
01480 - CDMX

At n: **Dra. Nilza Aslim Rojas Arroyo**
Directora de Investigación
Operativa Epidemiológica

Realizada la revisión del **Protocolo CI-07/22: "Asociación entre la mortalidad por COVID-19 y la exposición a material particulado $PM_{2.5}$ en la Zona Metropolitana del Valle de México durante el periodo 2020 a 2021."** el Comité de Investigación de la Dirección General de Epidemiología emitió el dictamen de Aprobado.

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente
Presidente del Comité de Investigación de la
Dirección General de Epidemiología

Dra. Guadalupe Silvia García de la Torre

Ccp - Expediente
GGT/GLA/jpr



Anexo 6. Dictamen de aprobación del Comité de Ética en Investigación.



SALUD
SECRETARÍA DE SALUD

SUBSECRETARÍA DE PREVENCIÓN
Y PROMOCIÓN DE LA SALUD

DIRECCIÓN GENERAL
DE EPIDEMIOLOGÍA



2022 *Flores*
Magón
ANIVERSARIO DE LA INDEPENDENCIA NACIONAL

Ciudad de México, a 15 de noviembre de 2022

Oficio. No. CEI-016-2022

Asunto: DICTAMEN APROBADO

Dra. Diana Vidal Aguirre
Francisco de P. Miranda No. 157-3er Piso,
Col. Lomas de Plateros, Alcaldía Álvaro Obregón CP 01480
P R E S E N T E.

Estimada Dra. Vidal Aguirre:

Concluida la revisión del protocolo **Protocolo CEI-005/22** titulado "Asociación entre la mortalidad por COVID-19 y la exposición a material particulado $PM_{2.5}$ en la Zona Metropolitana del Valle de México durante el periodo 2020 a 2021.", que usted presentó ante el Comité de Ética en Investigación de la Dirección General de Epidemiología, le informo que, posterior a esta revisión, se emite el dictamen de Aprobado, en atención de haber cumplido satisfactoriamente con los requerimientos y criterios éticos señalados en el Reglamento Interno de este CEI, en el citado protocolo.

Por lo anterior, se le informa que, con este Dictamen, se compromete usted a entregar de manera trimestral los informes técnico-descriptivos parciales con los avances del protocolo, de acuerdo a las fechas que usted incluyó en su cronograma, a fin de que este Comité verifique la continuidad de la línea de investigación autorizada, así como también enviará el informe técnico-descriptivo final en los 30 días posteriores a la conclusión del estudio.

Así mismo si el presente protocolo, da lugar a la publicación de un artículo, deberá enviar copia del mismo a este Comité.

Sin otro particular, reciba las seguridades de mi consideración.

Atentamente

D.C. Octaviano H. Domínguez Márquez
Presidente del Comité de Ética en Investigación

c.c. Nilza Aislin. Rojas Arroyo. -Directora de Investigación Operativa Epidemiológica. Para su conocimiento.

OHDM/RRJ/pr

Francisco de P. Miranda No. 157 - 3, Col. Lomas de Plateros, Álvaro Obregón, CDMX 01480 Tel. (55) 5337 1789
correo electrónico: comiteetica.investigacion@se.salud.gob.mx / com.investi@gmail.com

