



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

EFFECTOS DEL SARS-CoV-2 EN LA CALIDAD DEL  
AIRE SOBRE LA ZONA METROPOLITANA DEL  
VALLE DE MÉXICO

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

Licenciada en Ciencias de la Tierra con orientación en  
Ciencias Atmosféricas

PRESENTA:

Nancy Viridiana Vega Aguilar

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Harry Álvarez Ospina



Ciudad Universitaria, CDMX, 2022



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.

1. Datos del alumno

Nombre: Nancy Viridiana Vega Aguilar  
Teléfono: 5513408494  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Ciencias de la Tierra  
No. cuenta: 315254644

2. Datos del tutor

Dr. Harry Alvarez Ospina  
Secretario (director de tesis)  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias

3. Datos del sinodal 1

Dra. Claudia Inés Rivera Cárdenas  
Presidente del comité  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático

4. Datos del sinodal 2

Dr. Carlos Abraham Ochoa Moya  
Vocal  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático

5. Datos del sinodal 3

Dr. Rodolfo Omar Arellano Aguilar  
Suplente 1  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias

6. Datos del sinodal 4

Dr. Giovanni Alberto Carabalí Sandoval  
Suplente 2  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático

7. Datos del trabajo escrito

Efectos del SARS-CoV-2 en la calidad del aire sobre la Zona Metropolitana del Valle de México

2022

# Agradecimientos

---

A Dios.

Al Dr. Harry Alvarez por todo el apoyo que me dio durante la carrera, los consejos, la confianza que depositó en mí y por incluirme en este proyecto. Estoy convencida de que el haberlo hecho mi tutor desde orientación fue de las mejores decisiones que pude tomar. En definitiva, fue y siempre será, el mejor tutor que pude tener.

A mis sinodales, la Dra. Claudia y los Drs. Carlos, Omar y Giovanni por sus valiosas recomendaciones para este trabajo.

A mis padres y hermanos, especialmente a Ricky y mi mamá por todo el esfuerzo y difíciles sacrificios que hicieron para brindarme una educación de calidad y que la pudiera concluir; su apoyo en mis actividades extracurriculares; por brindarme todo lo que necesitaba y haberme soportado durante los finales de semestre.

Al IIE y ExxonMobil por haber creído en mí y apoyar este trabajo, por todas las oportunidades, experiencias y herramientas que me brindaron pues sin duda alguna, las llevaré conmigo a donde sea que vaya.

A Marco, por lo que he aprendido de él desde que lo conocí, por su apoyo incondicional y por siempre haberme animado cuando creía que ya no podía más.

A mis amigos y compañeros, aquellos que conocí cuando inicié la carrera y durante la orientación, por la amistad y todo lo que compartimos, especialmente a Vero, cuya amistad es la más valiosa que hice durante la licenciatura, no hay mejor amiga que ella.

Finalmente quiero agradecer a los demás docentes y profesores adjuntos que conocí, de manera especial a Andrés por ayudarme cuando me mandaba error el código y a quienes a lo largo de este viaje compartieron conmigo conocimiento, experiencias de vida y consejos.

# Índice general

Índice de figuras	IV
Índice de tablas	VI
<b>1. Introducción</b>	<b>3</b>
<b>Introducción</b>	<b>3</b>
<b>2. Marco teórico</b>	<b>5</b>
2.1. Contaminación atmosférica . . . . .	5
2.1.1. MATERIAL PARTICULADO (PM) . . . . .	6
2.1.2. MONÓXIDO DE CARBONO (CO) . . . . .	7
2.1.3. ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO <sub>X</sub> ) . . . . .	7
2.1.4. OZONO (O <sub>3</sub> ) . . . . .	8
2.2. Normatividad . . . . .	9
<b>3. Objetivos</b>	<b>11</b>
3.1. Objetivo general. . . . .	11
3.2. Objetivos específicos. . . . .	11
<b>4. Metodología</b>	<b>13</b>
4.1. Sitio de muestreo . . . . .	13
4.1.1. Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) . . . . .	14
4.1.2. Merced (MER) . . . . .	15
4.1.3. San Agustín (SAG) . . . . .	17
4.2. Procesamiento de los datos . . . . .	18
<b>5. Resultados y Discusión.</b>	<b>19</b>
5.1. Monóxido de carbono. . . . .	19
5.2. Óxidos de nitrógeno. . . . .	22
5.3. Ozono. . . . .	27
5.4. Material Particulado de 2.5 $\mu m$ . . . . .	30

**6. Conclusiones**

**35**

# Índice de figuras

4.1. Mapa de la ZMVM con las estaciones seleccionadas (resaltadas en rojo). Imagen recuperada de <a href="http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%7B%5C%7D27ZaBhmmM=%7B%5C%7D27">http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%7B%5C%7D27ZaBhmmM=%7B%5C%7D27</a> . . . . .	13
4.2. Vista frontal de la estación de monitoreo CCA. Recuperado de <a href="http://www.aire.cdmx.gob.mx/entornos/entorno{ }detalle.php?est=dHVx">http://www.aire.cdmx.gob.mx/entornos/entorno{ }detalle.php?est=dHVx</a> . . . . .	14
4.3. Vistas a cada uno de los puntos cardinales desde la estación CCA. Recuperado de <a href="http://www.aire.cdmx.gob.mx/entornos/entorno{ }detalle.php?est=dHVx">http://www.aire.cdmx.gob.mx/entornos/entorno{ }detalle.php?est=dHVx</a> . . . . .	14
4.4. Imagen satelital que muestra la ubicación de la estación CCA y sus alrededores. Obtenida de Google Earth. . . . .	15
4.5. Caseta de la estación de monitoreo con clave MER. Recuperado de <a href="http://www.aire.cdmx.gob.mx/entornos/entorno{ }detalle.php?est=fneC">http://www.aire.cdmx.gob.mx/entornos/entorno{ }detalle.php?est=fneC</a> . . . . .	16
4.6. Vistas a cada uno de los puntos cardinales desde la estación MER. Recuperado de <a href="http://www.aire.cdmx.gob.mx/entornos/entorno{ }detalle.php?est=fneC">http://www.aire.cdmx.gob.mx/entornos/entorno{ }detalle.php?est=fneC</a> . . . . .	16
4.7. Imagen satelital que muestra la ubicación de la estación MER y sus alrededores. Obtenida de Google Earth. . . . .	16
4.8. Caseta de monitoreo atmosférico con clave SAG. Recuperado de <a href="http://www.aire.cdmx.gob.mx/entornos/entorno{ }detalle.php?est=hHN3">http://www.aire.cdmx.gob.mx/entornos/entorno{ }detalle.php?est=hHN3</a> . . . . .	17
4.9. Vistas a cada uno de los puntos cardinales desde la estación SAG. Recuperado de <a href="http://www.aire.cdmx.gob.mx/entornos/entorno{ }detalle.php?est=hHN3">http://www.aire.cdmx.gob.mx/entornos/entorno{ }detalle.php?est=hHN3</a> . . . . .	17
4.10. Imagen satelital que muestra la ubicación de la estación SAG y sus alrededores. Obtenida de Google Earth. . . . .	18
5.1. Series de tiempo de las concentraciones promedio horarias del CO para los años 2019 y 2020 (con fechas clave de la pandemia). El valor límite especificado por la NOM-021 se representa como la línea fucsia. . . . .	20
5.2. Ciclos diurnos del CO para cada una de las estaciones en los años 2019 y 2020. . . . .	21
5.3. Series de tiempo de las concentraciones promedio horarias de los $NO_x$ para los años 2019 y 2020 (con fechas clave de la pandemia). El valor límite especificado por la NOM-023 se representa como la línea fucsia. . . . .	23
5.4. Ciclos diurnos de los $NO_x$ para cada una de las estaciones en los años 2019 y 2020. . . . .	26

5.5. Series de tiempo de las concentraciones promedio horarias del $O_3$ para los años 2019 y 2020 (con fechas clave de la pandemia). El valor límite especificado por la NOM-020 se representa como la línea fucsia. . . . .	27
5.6. Ciclos diurnos del $O_3$ para cada una de las estaciones en los años 2019 y 2020. . .	29
5.7. Series de tiempo de las concentraciones promedio diarias del $PM_{2.5}$ para los años 2019 y 2020 (con fechas clave de la pandemia). El valor límite especificado por la NOM-025 se representa como la línea fucsia. . . . .	31
5.8. Ciclos diurnos del $PM_{2.5}$ para cada una de las estaciones en los años 2019 y 2020.	33
5.9. Saturación vehicular promedio mensual en 2020 en la Ciudad de México. Gráfico elaborado por TomTom Traffic Index ( <a href="https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index/mexico-city-traffic/">https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index/mexico-city-traffic/</a> ) . . . . .	34



# Índice de tablas

2.1. Tabla comparativa con las normas mexicanas para cada uno de los contaminantes criterio de interés. . . . .	9
2.2. Valores límites actualizados en 2014 para las normas mexicanas. . . . .	9
5.1. Valores máximos y mínimos en ppm para el CO durante los años 2019 y 2020. . .	19
5.2. Número de días por año y por estación en los que se rebasó el valor de la norma mexicana para $O_3$ , $NO_2$ y $PM_{2.5}$ . . . . .	24
5.3. Valores máximos y mínimos en ppb para el $NO_x$ durante los años 2019 y 2020. .	24
5.4. Valores máximos y mínimos en ppb para el $O_3$ durante los años 2019 y 2020. . .	28
5.5. Valores máximos y mínimos en $\mu g/m^3$ para el $PM_{2.5}$ durante los años 2019 y 2020.	32

# Resumen

---

En la Zona Metropolitana del Valle de México, dada la alta densidad poblacional, movilidad de vehículos y las condiciones orográficas, uno de los problemas ambientales más comunes es la mala calidad del aire, la cual aparte de una alta concentración de contaminantes, presenta diversos tipos o naturaleza de contaminantes que puede derivar en problemas de salud para la población en general.

Durante el año 2020, debido al aislamiento social y cese de algunas actividades industriales, se presentó una oportunidad nunca antes vista para monitorear el cambio en la concentraciones de los contaminantes asociados a la movilidad en el Valle de México y determinar el impacto que tienen estas en la calidad del aire comparando sus concentraciones contra las del 2019. En este trabajo, se evaluó la concentración de cuatro contaminantes: material particulado ( $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ ), óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), monóxido de carbono (CO) y ozono ( $O_3$ ) en tres estaciones de monitoreo (Centro de Ciencias de la Atmósfera, La Merced y San Agustín) para abarcar las zonas sur, centro y norte del Valle de México.

En el caso del CO, las concentraciones nunca superaron el valor de la norma mexicana en ninguno de los años de estudio. Aunque en la estación SAG se tuvieron las mayores concentraciones durante el 2019 (0.493 ppm) y en la estación MER durante el 2020 (0.427 ppm). El  $O_3$  por otro lado, presentó varios registros por encima del valor crítico en 2019 y en 2020, siendo las estaciones MER y SAG las que presentaron el menor número de eventos, mientras que en el CCA fue mayor. La estación con mayores concentraciones en 2019 y en 2020 fue el CCA (32.55 ppb y 35.15 ppb, respectivamente).

Para las  $PM_{2.5}$  en el año 2019 se obtuvo que en las estaciones MER y CCA se rebasó el valor de la norma durante 10 días por la presencia de incendios forestales alrededor del Valle de México que derivaron en una contingencia ambiental. En la estación SAG no se obtuvieron datos de calidad para dicho año y en los existentes, sólo se rebasó el valor crítico durante 3 ocasiones. Por otro lado, durante el año 2020 sólo se superó una vez el valor de la norma en el CCA y dos ocasiones en la estación MER. Para SAG, durante 2020 no se rebasó el valor crítico. La estación SAG obtuvo los registros de concentraciones más altas en 2019 con  $26.43 \mu g/m^3$  de acuerdo con los datos existentes y la estación MER durante el 2020 con un valor promedio de  $30 \mu g/m^3$ .

Finalmente, para los  $NO_x$ , en la estación CCA las concentraciones se mantuvieron casi constantes en ambos años puesto que los valores máximos fueron de 208 ppb para el 2019 y 211 ppb para el 2020. Tomando en cuenta el valor de la norma para el  $NO_2$ , en la estación CCA

nunca se rebasó el valor crítico durante 2019 pero en 2020 se rebasó durante una ocasión. Por otro lado, en la estación MER se rebasó el valor de la norma en 36 ocasiones durante 2019 y 26 veces en el 2020. En la estación SAG se superó el valor en 16 ocasiones en el año 2019 y 10 en el 2020. De esta forma, la estación MER presentó las concentraciones más altas durante el año 2019 y 2020 con 51.54 ppb y 43.69 ppb respectivamente.

Al realizar la comparación con el año 2019 se obtuvo que las concentraciones de PM,  $NO_x$  y CO, disminuyeron en todas las estaciones. Mientras que las del  $O_3$  presentaron un aumento. Sin embargo, dado que solo se consideró un año base (2019), los datos tomados en cuenta no fueron suficientes para estimar si los cambios en las concentraciones fueron significativos o no.

# Introducción

---

La contaminación atmosférica se puede definir como la presencia de partículas y/o gases en la atmósfera con potencial de provocar daños o molestias en las personas, plantas y animales (IDEAM, 2022). Las principales fuentes de emisión de estos contaminantes son la actividad industrial y los procesos de combustión incompleta por parte de los automóviles (Querol, 2018).

Cuando se lleva a cabo un proceso de combustión incompleta a altas temperaturas, se liberan contaminantes como el monóxido de carbono ( $CO_x$ ), los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) que incluyen compuestos como el óxido de nitrógeno (NO) y dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), que es producido a través de la oxidación del NO. También, se pueden emitir partículas sólidas denominadas material particulado (PM) que se forman en las cámaras de combustión donde el combustible se encuentra a altas temperaturas. Así mismo, se liberan otros contaminantes y gases de efecto invernadero como el metano ( $CH_4$ ), dióxido de azufre ( $SO_2$ ) y plomo ( $Pb$ ) (Querol, 2018). Sin embargo, no todos estos contaminantes se consideran dentro de las normas de salud pública puesto que algunos son emitidos en cantidades muy pequeñas y no todos tienen el mismo potencial para causar daños en la salud.

Los contaminantes considerados por las normas de salud donde se especifica un valor máximo de concentraciones en el ambiente para así proteger la salud de la población, reciben el nombre de *contaminantes criterio*. Dentro de este grupo se encuentran el CO, el ozono ( $O_3$ ),  $SO_2$ ,  $NO_2$ , el material particulado de 10 y 2.5 micrómetros ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , respectivamente) y el Pb (COFEPRIS, 2017).

En México, desde la década de los 80s se monitorean las concentraciones del  $O_3$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$ ,  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  a través de diferentes redes (v.gr. REDMET, REDMA, RAMA, REDDA). Siendo el  $O_3$  y PM los contaminantes de mayor abundancia en la ciudad (Querol, 2018). Durante el año 2020 con la llegada del Covid-19 al país, la movilidad y actividad industrial del Valle de México se vio modificada por las normas de aislamiento social dictaminadas por el gobierno federal. La movilidad de los automóviles fue una de las modificaciones mas importantes, con lo cual se pudo observar a una mejoría en la calidad del aire. Por esta razón, en el presente proyecto de investigación se tuvo como objetivo confirmar a través del análisis del comportamiento de los contaminantes criterio en tres diferentes puntos de la ZMVM, si ocurrió una disminución en la

## 1. INTRODUCCIÓN

---

concentración ocasionada por el aislamiento social durante la pandemia por Covid 19 para el periodo 2019-2020.

## 2.1. Contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica es una condición provocada por la emisión de gases y partículas (contaminantes) en concentraciones lo suficientemente altas comparadas con sus niveles normales debido a actividades humanas. La contaminación del aire ha tomado mucha importancia en el último tiempo debido a que está estrechamente relacionada con enfermedades pulmonares, cardiovasculares, neuronales y del sistema inmunológico, donde los grupos de riesgo son los infantes y los niños, ya que son los más vulnerables a la neurotoxicidad, debido a la susceptibilidad del cerebro durante los periodos de desarrollo (Ahrens, 2009; Levy, 2015).

El impacto de la contaminación puede variar desde una escala urbana o local hasta una regional o de mesoescala, la primera puede abarcar aproximadamente 100 m mientras que la segunda hasta cientos de km (Giordano, 2019).

Dentro de los contaminantes que se tienen mayor evidencia que causan un efecto adverso en la salud y que son monitoreados por la Organización Mundial para la Salud (WHO, por sus siglas en inglés) son los siguientes:

- $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$
- CO
- $NO_2$
- $O_3$

Estos contaminantes mencionados se les conoce con el nombre de contaminantes criterio y esto es debido a que fueron objeto de evaluaciones científicas publicadas en el documento llamado “criterios de calidad del aire” por Air Quality Criteria en los Estados Unidos (EPA, 2016). Otra característica de estos contaminantes es que son sustancias que son liberados en

grandes cantidades a la atmósfera de diferentes fuentes y presentan un riesgo a la salud y al medio ambiente. A continuación, se mencionan las principales características de los contaminantes criterio:

### 2.1.1. MATERIAL PARTICULADO (PM)

El material particulado se define como una mezcla de partículas sólidas y líquidas (polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento y polen, entre otras) con un diámetro aerodinámico de 10 nm a 100  $\mu\text{m}$  suspendidas en el aire (Ahrens, 2009). La EPA ha identificado dos importantes grupos dentro de las PM: el material particulado con diámetro aerodinámico menor o igual a 10  $\mu\text{m}$  ( $PM_{10}$ ) y con diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5  $\mu\text{m}$  ( $PM_{2.5}$ ).

Las fuentes de emisión de las PM a la atmósfera pueden ser naturales y/o antropogénicas. Entre las fuentes naturales se encuentran las sales marinas, erupciones volcánicas, partículas biológicas, polvo re-suspendido del suelo e incendios forestales, mientras que de las fuentes antropogénicas se pueden mencionar la quema de combustibles fósiles, procesos industriales, agricultura, construcción, plantas de cemento e industrias cerámicas, minería y fuentes móviles (Lutgens, 2005). En el caso puntual de las  $PM_{10}$  su origen se asocia a la suspensión o re-suspensión de polvo, suelo u otro material de la corteza terrestre, así como a partículas provenientes de sales marinas. Dentro de las actividades económicas que influyen en mayor proporción se encuentran la minería y la agricultura. Las  $PM_{2.5}$  son emitidas principalmente, durante procesos de combustión ya sea por vehículos, industrias generadoras de energía, plantas de cemento, fundidoras y/o quema de biomasa. Estas últimas, adquieren o juegan un papel muy importante en la atmósfera ya que pueden actuar como núcleo para la condensación y congelación del vapor de agua (Manahan, 2007).

Los efectos en la salud asociados a altas concentraciones de material particulado varían según el tamaño de partícula, ya que, entre más pequeñas, su alcance es mayor dentro del sistema respiratorio. Las  $PM_{10}$  suelen llegar desde la laringe hasta la región torácica, mientras que las  $PM_{2.5}$  son capaces de llegar al sistema respiratorio profundo y en consecuencia ser transferidos al torrente sanguíneo (SEDEMA, 2016). Dada la capacidad de penetración en el organismo, las partículas pueden ocasionar diversos daños, tal es el caso de las  $PM_{10}$  que se asocia con inflamación pulmonar, padecer cáncer de pulmón, aceleración de la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (disminución de la función pulmonar) y el incremento de la vulnerabilidad ante enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Chow et al. 2006; *America's Children and the Environment. Criteria Air Pollutants*, 2015). Las  $PM_{2.5}$  se asocian con el incremento de la capacidad de formar coágulos en la sangre (trombosis), reducción de la saturación de oxígeno en la sangre, pueden aumentar la probabilidad de nacimientos prematuros y de padecer cáncer de pulmón. Además, la exposición a  $PM_{2.5}$  disminuye la circulación de la sangre que llega al corazón, lo que causa una afectación a la función cardíaca, así como afectar el volumen de los vasos sanguíneos y provocar una alteración en la presión arterial (Chow et al. 2006; Querol, 2018).

En la Ciudad de México y ZMVM es común encontrar valores por encima de lo permitido de estos contaminantes, de manera principal durante los meses de noviembre a febrero por la

presencia de inversiones térmicas (SEDEMA, 2020).

### 2.1.2. MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

El monóxido de carbono es un gas incoloro, inodoro, imperceptible en el aire y tóxico en altas concentraciones (Levy, 2015). Es considerado el contaminante primario más abundante dentro del aire (Ahrens, 2009). El CO se emite a la atmósfera durante los procesos de combustión incompleta de material orgánico (gasolina, Diésel y biomasa) (SEDEMA, 2016).

También existen fuentes de emisión menores, tales como calentadores de agua y estufas de gas y carbón, las cuales se asocian a lugares cerrados como casas o apartamentos (Jacobson, 2002; Manahan, 2007). En forma natural el CO se genera a partir de la oxidación de metano, comúnmente producida por la descomposición de materia orgánica (<https://montevideo.gub.uy/areas-tematicas/ambiente/calidad-del-aire/principales-contaminantes-del-aire>). La concentración global de CO varía entre los 50 y 120 ppb en la tropósfera y se estima que aproximadamente el 60 % de estos niveles se atribuyen a actividades antrópicas (Levy, 2015).

El CO puede causar efectos adversos en la salud, ya que compite con el oxígeno ( $O_2$ ) en el torrente sanguíneo, lo que reduce la capacidad de la sangre de transportar el  $O_2$  a los diferentes órganos (*America's Children and the Environment. Criteria Air Pollutants*, 2015). Las personas sensibles, particularmente las que tienen problemas cardíacos, pueden ver disminuida su capacidad de oxigenación (<https://montevideo.gub.uy/areas-tematicas/ambiente/calidad-del-aire/principales-contaminantes-del-aire>). Algunas manifestaciones de toxicidad aguda por CO son: hipotensión (presión sanguínea baja), arritmia (alteración en la frecuencia cardíaca) e isquemia (disminución de la circulación de sangre en una zona específica). Por otro lado, los efectos neurológicos van desde un dolor de cabeza, mareos, pérdida de juicio, confusión, pérdida del conocimiento y convulsiones hasta un derrame cerebral o incluso la muerte. De acuerdo con el Informe Anual de Calidad del Aire de 2018, en la CDMX los niveles de CO han ido disminuyendo desde el 2001 (SEDEMA, 2020).

### 2.1.3. ÓXIDOS DE NITRÓGENO ( $NO_x$ )

Los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) son la suma de dos gases: NO y  $NO_2$ . El NO es un contaminante inodoro e incoloro emitido en cantidades mucho mayores (95 %) que el  $NO_2$  (5 %), que es un contaminante que tiene un fuerte olor característico y una coloración café. Dado lo anterior, el NO se considera un contaminante primario, mientras que el  $NO_2$ , es tanto primario como secundario, ya que también se forma por la oxidación del NO. La emisión de estos gases se debe fundamentalmente a transporte (62 %), combustión para generación de energía, mecánica y eléctrica (30 %) y procesos industriales (7 %) y de forma natural se emiten debido a descomposición bacteriana, incendios forestales y actividad volcánica (<https://montevideo.gub.uy/areas-tematicas/ambiente/calidad-del-aire/principales-contaminantes-del-aire>).



La concentración de NO en la tropósfera global es de alrededor de 5 ppt y en zonas urbanas la concentración puede alcanzar 100 ppm por la mañana, mientras que la concentración de  $NO_2$  en zonas urbanas va de 100 a 250 ppb (Jacobson, 2002; Manahan, 2007).

El  $NO_2$  causa efectos perjudiciales en los bronquios, puede irritar los pulmones, es decir puede bajar la resistencia a infecciones y enfermedades respiratorias. La exposición a concentraciones mayores de 80 ppb se asocia con dolor de garganta y resfriados, mientras que exposiciones de 150 a 200 ppm conllevan al padecimiento de bronquitis fibrosa y concentraciones mayores de 500 ppm pueden ocasionar la muerte (Jacobson, 2002; Manahan, 2007). Por otro lado, el NO se adhiere a la hemoglobina y reduce la eficiencia del transporte de oxígeno a los tejidos del organismo. Sin embargo, ya que las concentraciones de CO son más altas normalmente que las del NO, este efecto se considera poco relevante (Manahan, 2007). Los  $NO_x$  en conjunto contribuyen al desarrollo de asma en niños (*America's Children and the Environment. Criteria Air Pollutants*, 2015), bronquitis, nacimientos prematuros (antes de 37 semanas de embarazo) y enfermedades respiratorias crónicas (Querol, 2018). También contribuyen a la formación de la lluvia ácida, aumenta la concentración de nitratos en suelos y aguas superficiales.

De acuerdo con la SEDEMA, las concentraciones de  $NO_2$  desde el 2010 al 2018 se han mantenido por debajo de lo estipulado. (SEDEMA, 2020).

### 2.1.4. OZONO ( $O_3$ )

El ozono es un contaminante secundario incoloro e irritante que se forma por reacciones fotoquímicas en la atmósfera entre los Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs), el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno (Crespo, 2017), por lo tanto, la tasa de ozono en ciudades altamente industrializadas y pobladas presenta una alta concentración de este contaminante (Potrillo, 2017) y su formación depende de la relación  $NO_x$ /COVs (SEDEMA, 2016). Los COVs en la ZMVM provienen en su mayoría del sector residencial por fugas y combustión incompleta de gas LP, comercios y servicios (57 %); seguido del sector industrial (18 %) y de transporte (17 %). Dado que el ozono se forma fotoquímicamente, su formación ocurre solamente durante horas del día, siendo los meses de mayor radiación (verano) cuando su tasa de formación crece. La concentración de  $O_3$  mundial varía entre 20 y 40 ppb; mientras que en las zonas urbanas oscila entre 11 y 500 ppb (Jacobson, 2002).

El ozono puede causar problemas para respirar, inflamación en el recubrimiento de los pulmones, ataques de asma, lesiones en el tejido pulmonar, irritación de ojos, nariz y garganta, y en ocasiones la muerte prematura (Ahrens, 2009; SEDEMA, 2016; *America's Children and the Environment. Criteria Air Pollutants*, 2015). Numerosos estudios indican que las consultas por crisis de asma pueden aumentar más de 30 % si la concentración de ozono supera los 11 ppb (Montero, 2011), mientras que a concentraciones mayores de 150 ppb, las personas padecen un intenso dolor de cabeza y a concentraciones mayores de 300 ppb experimentan dolor en el pecho, dificultad para respirar y tos (Jacobson, 2002).

## 2.2. Normatividad

En México se establecieron las primeras normas de los contaminantes criterio en el año de 1994 por parte de la Secretaría de Salud con el objetivo de regular las concentraciones y de disminuir las afectaciones en la salud, en especial a los niños, adultos mayores y personas con enfermedades respiratorias. Estas normas oficiales establecen los valores máximos permisibles de concentración de cada contaminante criterio por un tiempo determinado (INECC, 2007).

- NOM-021-SSA1-1993 para monóxido de carbono.
- NOM-025-SSA1-1993 para partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$
- NOM-020-SSA1-1993 para ozono.
- NOM-023-SSA1-1993 para dióxido de nitrógeno.

Estos límites máximos permisibles se establecieron tomando como referencia los valores establecidos por la EPA, Organización Mundial de la Salud (OMS) y algunos países europeos. En Tabla 2.1 se muestra la comparación entre las normas mexicanas y las establecidas por otros organismos.

Contaminante	Valor límite (Norma mexicana)	Valor límite (EPA)	Valor límite (OMS)
$O_3$	0.11 ppm	0.07 ppm promedio de 8 horas.	0.1 ppm promedio de 8 horas
CO	11 ppm promedio móvil de 8 horas	9 ppm promedio de 8 horas	0.004 ppm promedio máximo 24 horas
$NO_2$	0.210 ppm promedio horario	0.1 ppm promedio horario	0.025 ppm promedio máximo 24 horas
$PM_{2.5}$	$65 \mu g/m^3$ máximo promedio de 24 horas	$35 \mu g/m^3$ promedio máximo 24 horas	$15 \mu g/m^3$ promedio máximo 24 horas

**Tabla 2.1:** Tabla comparativa con las normas mexicanas para cada uno de los contaminantes criterio de interés.

Cabe mencionar que algunas de estas normas establecidas inicialmente se modificaron en el año 2014 (Tabla 2.2), tal es el caso de las partículas suspendidas  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ , así como el ozono, esto es con el objetivo de mejorar la calidad del aire y disminuir tanto la contaminación como los efectos sobre la población.

- NOM-025-SSA1-2014 para partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$
- NOM-020-SSA1-2014 para ozono

Contaminante	Valor límite (Norma Mexicana)
$O_3$	0.095 ppm promedio horario
$PM_{2.5}$	$45 \mu g/m^3$ máximo promedio 24 horas.

**Tabla 2.2:** Valores límites actualizados en 2014 para las normas mexicanas.

Las normas que estuvieron vigentes durante el periodo de estudio (2019 y 2020) y que se consideraron para realizar el análisis fueron las NOM-021-SSA1-1993 (CO), NOM-023-SSA1-1993 ( $NO_2$ ), NOM-020-SSA1-2014 ( $O_3$ ) y NOM-025-SSA1-2014 ( $PM_{2.5}$ ). Sin embargo, actualmente y desde octubre de 2021 ya se encuentran disponibles otros valores críticos por una nueva actualización en las normas, las cuales pueden ser consultadas en <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhmI=&dc=%27Yw==>.

### 3.1. Objetivo general.

Analizar el comportamiento de los contaminantes criterio en tres diferentes puntos de la ZMVM y determinar si ocurrió una disminución en la concentración ocasionada por el aislamiento social durante la pandemia por Covid 19 para el periodo 2019-2020.

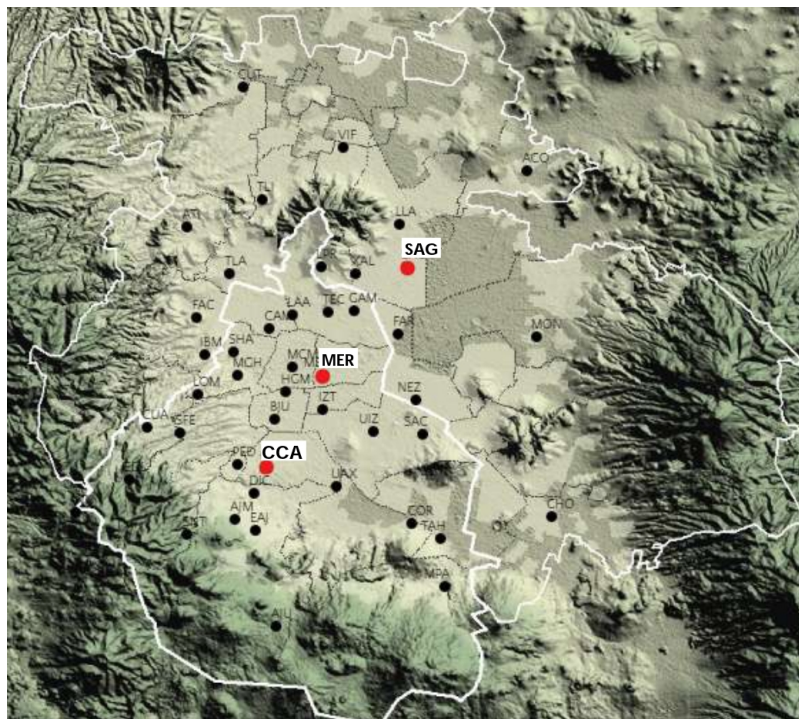
### 3.2. Objetivos específicos.

- Conocer la concentración de los contaminantes criterio en tres diferentes puntos de la ZMVM para el periodo 2019-2020.
- Comparar los promedios de las concentraciones de los contaminantes criterio con las normas vigentes de la Secretaría de Salud para conocer la calidad del aire en la zona de estudio.
- Describir la variabilidad en las concentraciones de contaminantes criterio a diferentes escalas de tiempo (diurno, mensual y anual) en tres diferentes puntos de la ZMVM para el periodo 2019-2020.
- Comparar los promedios de las concentraciones de los contaminantes criterio entre los tres diferentes puntos de la ZMVM estudiados.
- Comparar los promedios de las concentraciones de los contaminantes criterio entre el 2019 y 2020 en los tres diferentes puntos de la ZMVM y determinar si ocurrió una disminución en la concentración ocasionada por el aislamiento social durante la pandemia por Covid 19.



### 4.1. Sitio de muestreo

Con el fin de determinar si hubo una disminución en la concentración de los contaminantes criterio ocasionada por el aislamiento social durante la pandemia por Covid 19, se realizó un análisis de las concentraciones de 2019 y 2020 en tres diferentes estaciones de monitoreo ambiental de la RAMA: CCA, MER y SAG. Las ubicaciones seleccionadas fueron elegidas con el objetivo de abarcar la zona sur, centro y norte de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), tal como se aprecia en la Figura 4.1. El periodo de estudio comprendido fue de enero del 2019 a noviembre del 2020.



**Fig. 4.1:** Mapa de la ZMVM con las estaciones seleccionadas (resaltadas en rojo). Imagen recuperada de <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%7B%5C%7D27ZaBhnmM=%7B%5C%7D27>

### 4.1.1. Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA)

La estación CCA está ubicada en la alcaldía Coyoacán, en la azotea del Centro de Ciencias de la Atmósfera (Figura 4.2) con coordenadas 19.3262°N y 99.1761°O, y una elevación de 2280 m sobre el nivel del mar (msnm) (Murillo, 2017). La estación se encuentra ubicada dentro de una zona urbana en la parte sur de la ZMVM rodeada por amplias áreas verdes como se observa en las Figuras 4.3 y 4.4, tal es el caso de la Reserva del Pedregal de San Ángel que se encuentra a 1.4 km de la estación (Salcedo et al. 2018). El tránsito en la zona es local y transitan principalmente autobuses y/o autos particulares. Sin embargo, a 650 m se localiza la Avenida Antonio Delfín Madrigal donde de manera constante hay tránsito de vehículos, camiones pesados y motocicletas.



Fig. 4.2: Vista frontal de la estación de monitoreo CCA. Recuperado de <http://www.aire.cdmx.gob.mx/entornos/entorno{ }detalle.php?est=dHVx>



Fig. 4.3: Vistas a cada uno de los puntos cardinales desde la estación CCA. Recuperado de <http://www.aire.cdmx.gob.mx/entornos/entorno{ }detalle.php?est=dHVx>

## 4.1 Sitio de muestreo



Fig. 4.4: Imagen satelital que muestra la ubicación de la estación CCA y sus alrededores. Obtenida de Google Earth.

### 4.1.2. Merced (MER)

La estación MER se localiza en la alcaldía Venustiano Carranza sobre el Centro de Salud "Luis E. Ruiz"; (Figura 4.5) con coordenadas 19.42461°N y 99.119594°O y una elevación de 2245 msnm (<http://www.aire.cdmx.gob.mx/entornos/entorno{ }detalle.php?est=fneC>). La estación MER se ubica sobre la Avenida H. Congreso de la Unión donde suelen transitar vehículos de transporte público como microbuses, taxis, colectivos (combis), automóviles de carga, motocicletas y autos particulares. En los alrededores el uso de suelo es en su mayoría habitacional y comercial, aunque también hay algunas escuelas de educación básica en el área. A aproximadamente 210 m al sureste se encuentra el Jardín Chiapas que es un área verde con vegetación de temporal (Figuras 4.6 y 4.7) (Murillo-Tovar, 2012).

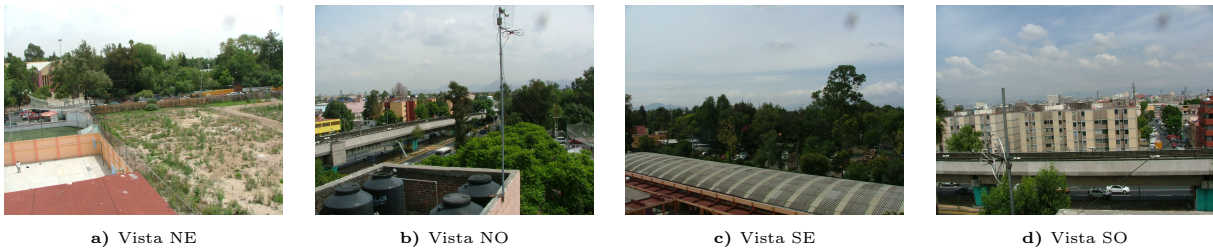


## 4. METODOLOGÍA

---



**Fig. 4.5:** Caseta de la estación de monitoreo con clave MER. Recuperado de <http://www.aire.cdmx.gob.mx/entornos/entorno{ }detalle.php?est=fneC>



a) Vista NE

b) Vista NO

c) Vista SE

d) Vista SO

**Fig. 4.6:** Vistas a cada uno de los puntos cardinales desde la estación MER. Recuperado de <http://www.aire.cdmx.gob.mx/entornos/entorno{ }detalle.php?est=fneC>



**Fig. 4.7:** Imagen satelital que muestra la ubicación de la estación MER y sus alrededores. Obtenida de Google Earth.

### 4.1.3. San Agustín (SAG)

La estación SAG se ubica en el municipio de Ecatepec de Morelos sobre el Centro de Salud Comunitario San Agustín (Figura 4.8) con coordenadas 19.532968°N y 99.030324°O y una elevación de 2241 msnm (<http://www.aire.cdmx.gob.mx/entornos/entorno{ }detalle.php?est=hHN3>). La estación se localiza sobre la Av. Santa Rita y la calle Sur 92 donde el tránsito es principalmente local de motocicletas, autos particulares y vehículos de carga como camiones. A aproximadamente 150 m se encuentra la Avenida Carlos Hank González que es una de las principales vialidades en el municipio, pues conecta el Estado de México con la Ciudad de México. En ella se tiene un continuo tránsito de autos particulares, motocicletas, vehículos de transporte de carga y de transporte público como taxis, combis, y microbuses. A sus alrededores el uso de suelo es habitacional con algunas áreas verdes con vegetación de temporal (Murillo-Tovar, 2012) como se aprecia en las Figuras 4.9 y 4.10.



**Fig. 4.8:** Caseta de monitoreo atmosférico con clave SAG. Recupero de <http://www.aire.cdmx.gob.mx/entornos/entorno{ }detalle.php?est=hHN3>



**Fig. 4.9:** Vistas a cada uno de los puntos cardinales desde la estación SAG. Recupero de <http://www.aire.cdmx.gob.mx/entornos/entorno{ }detalle.php?est=hHN3>



Fig. 4.10: Imagen satelital que muestra la ubicación de la estación SAG y sus alrededores. Obtenida de Google Earth.

### 4.2. Procesamiento de los datos

Las bases de datos fueron obtenidas de la página web de la SEDEMA: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc={%}27aKBh{%}27> y se realizó un filtrado de los datos con el objetivo de eliminar mediciones con valor de 0, -9999 y valores atípicos (anómalos) y de esta manera poder obtener las concentraciones de los contaminantes  $CO$ ,  $NO_x$ ,  $O_3$  y  $PM_{2.5}$  de las estaciones CCA, MER y SAG.

El último filtro consistió en graficar toda la serie de tiempo y observar los picos en los cuales las concentraciones cambiaban repentinamente, es decir, no se mostraba un aumento paulatino que se mantuviera por un tiempo considerable que pudiera asociarse a un determinado fenómeno de emisión. El segundo procedimiento para asegurar que no se incluyan datos atípicos, consistió en realizar un gráfico de dispersión en donde se representó tanto en el eje “x” como en el eje “y” los valores de concentración del contaminante. Sin embargo, estos valores se desfasaron una lectura, es decir, los valores para el eje “y” iniciaron en el tiempo 2 mientras que los del eje “x” iniciaron en el tiempo 1 y de esta manera poder descartar las lecturas que salieran de la tendencia que tienen los datos. Cabe mencionar que fue necesario revisar cuáles eran los datos que salían de la tendencia, ya que, si correspondían a algún día festivo o a una hora denominada como hora pico en la cual se tienen mayores emisiones de contaminantes, el dato se consideraba como válido. Una vez validados los datos que se encontraban cada hora, fue posible realizar las gráficas de serie de tiempo, ciclo diurno y mensual para cada contaminante, utilizando la paquetería de Open Air del software R Studio.

## Resultados y Discusión.

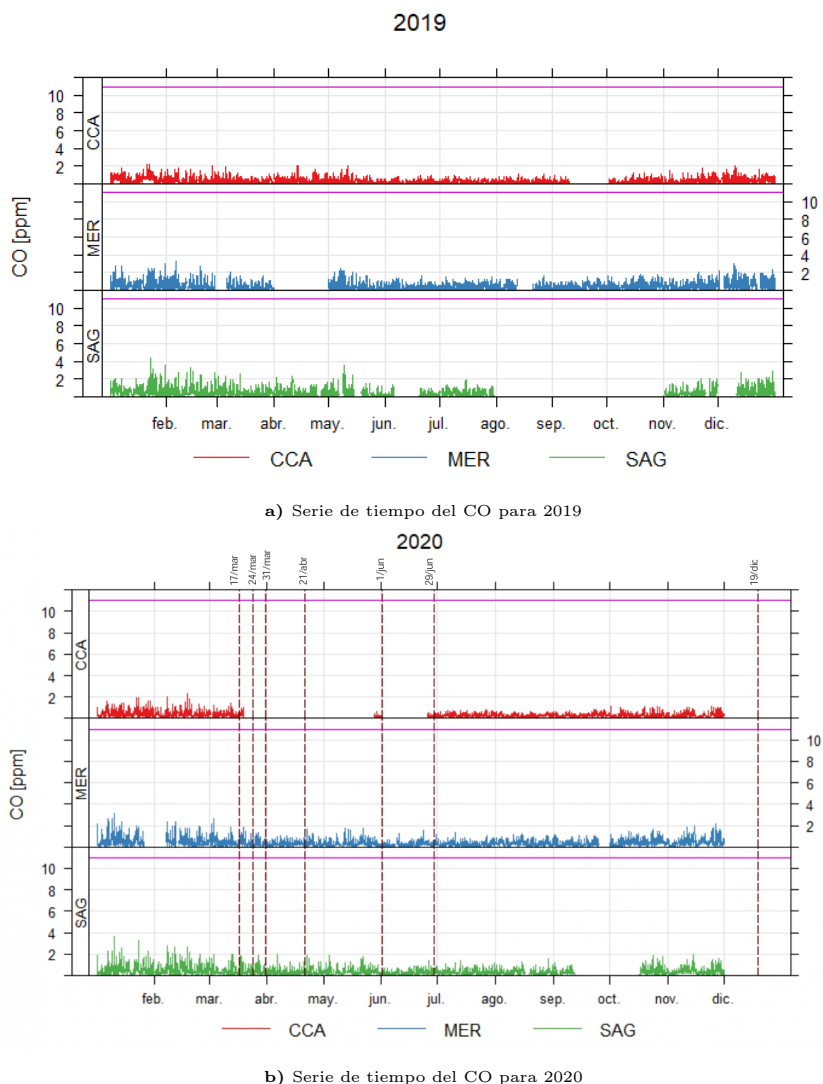
### 5.1. Monóxido de carbono.

En la Figura 5.1, se aprecia la serie de tiempo de la concentración de monóxido de carbono en ppm que se obtuvo con los promedios horarios para los años 2019 y 2020 de las estaciones de monitoreo la Merced, San Agustín y Centro de Ciencias de la Atmósfera. A partir de esta figura se pudo determinar que durante los dos años de estudio no se rebasó ningún día el valor de la Norma Mexicana NOM-021-SSA1-1993 (11 ppm). Este resultado coincide con los descritos para años anteriores en el Informe Anual de Calidad del Aire de 2018, en donde se menciona que desde 2001 no se ha superado el valor de la norma debido a las mejoras tecnológicas en los automóviles como los convertidores catalíticos (SEDEMA, 2020 y Querol, 2018). El valor promedio de la concentración de CO en el 2019 fue de 0.346, 0.487 y 0.493 ppm para CCA, MER y SAG, respectivamente. Mientras que para el 2020 el valor promedio fue de 0.297, 0.427 y 0.401 ppm para CCA, MER y SAG, respectivamente.

Con la finalidad de observar si las concentraciones máximas y mínimas fueron similares entre el 2019 y 2020, se realizó una tabla comparativa (Tabla 5.1) en donde se observó que en las tres estaciones se mantuvieron casi constantes puesto que no presentaron una variación marcada. Algo importante de destacar es que en todas las estaciones sí se pudo observar una disminución en el valor máximo para el 2020 comparado con el 2019. Sin embargo, al realizar la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney, no se obtuvo una diferencia estadísticamente significativa entre las concentraciones de este contaminante para ambos años. De esta forma, las diferencias encontradas entre los máximos y mínimos de concentraciones entre el 2019 y 2020 son un reflejo del aislamiento que comenzó de forma gradual en marzo y cuyo auge fue en abril con el inicio de la Fase 3 (21 de abril de 2020).

	CCA	MER	SAG
Máximo (2019)	2.2	3.3	4.3
Mínimo (2019)	0.1	0.1	0.1
Máximo (2020)	2.3	3.1	3.7
Mínimo (2020)	0.1	0.1	0.1

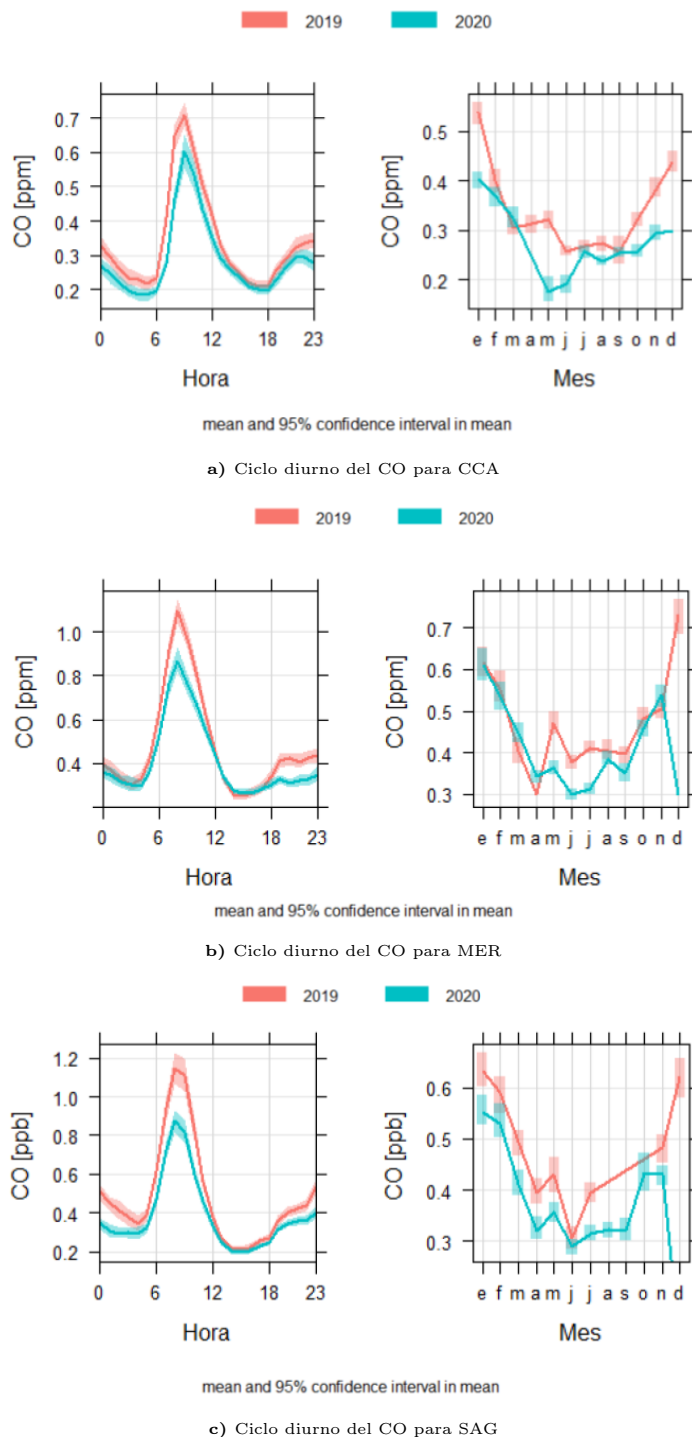
**Tabla 5.1:** Valores máximos y mínimos en ppm para el CO durante los años 2019 y 2020.



**Fig. 5.1:** Series de tiempo de las concentraciones promedio horarias del CO para los años 2019 y 2020 (con fechas clave de la pandemia). El valor límite especificado por la NOM-021 se representa como la línea fucsia.

En la Figura 5.2 se aprecia el ciclo diurno del monóxido de carbono para las tres estaciones durante los años 2019 y 2020, observándose el mismo comportamiento bimodal en cada estación, con máximos alrededor de las 8:00 y 22:00 horas. Estos picos que se presentan coinciden con las horas de mayor flujo vehicular, en donde la población se desplaza hacia sus trabajos y hacia sus casas, respectivamente. También, es importante mencionar que posterior al pico de las 8 horas se observa una disminución pronunciada y esta se asocia a una elevación de la capa límite. A partir de esta figura también se pudo confirmar la disminución de las concentraciones en el 2020 comparada con el 2019.

## 5.1 Monóxido de carbono.



**Fig. 5.2:** Ciclos diarios del CO para cada una de las estaciones en los años 2019 y 2020.

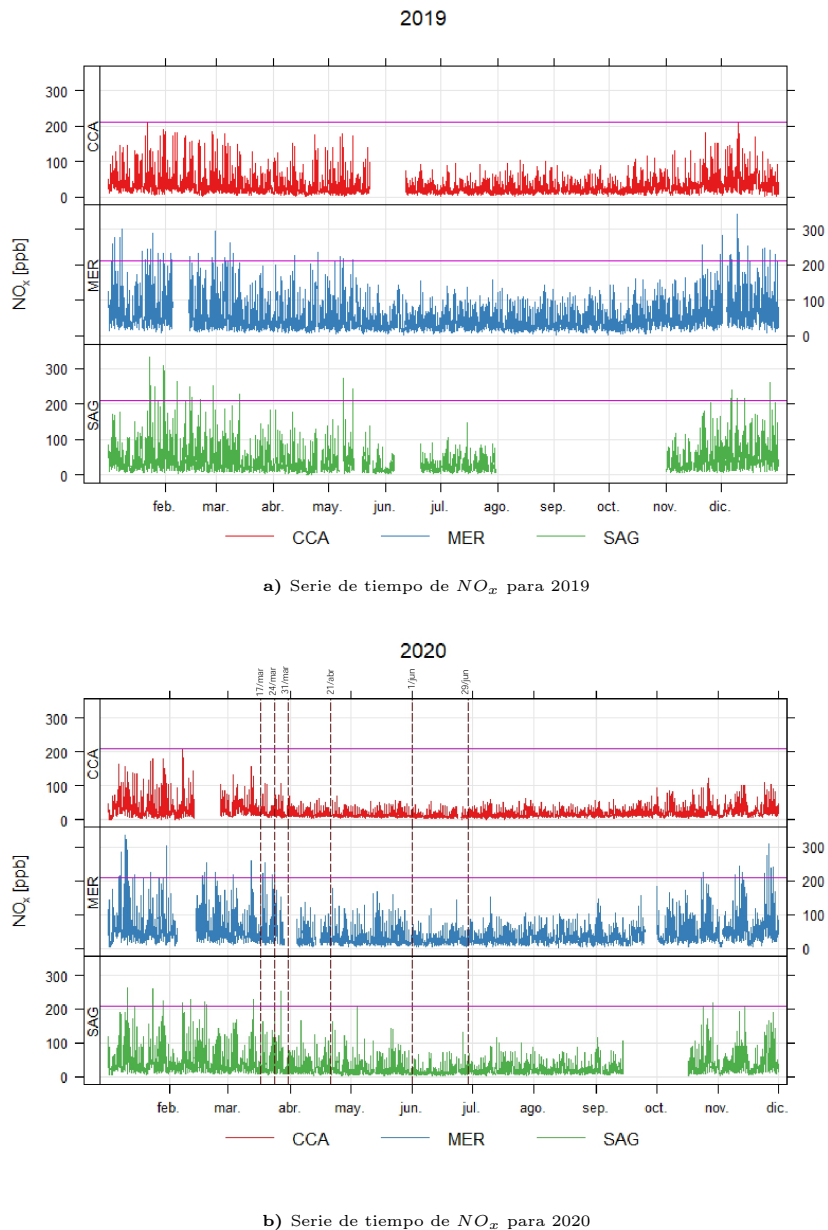
Respecto al comportamiento mensual (Figura 5.2), se pudo apreciar que, tanto en el 2019 como en el 2020, durante el mes de enero se presentaron las concentraciones más altas de este contaminante, con valores de 0.539 ppb para CCA, 0.618 ppb para MER y 0.634 ppb para SAG

en 2019 y de 0.403 ppb en el CCA, 0.608 ppb para MER y 0.553 ppb para SAG en 2020. Mientras, que el mes de menor concentración para el 2019, en las estaciones CCA, SAG y MER fue junio con valores de 0.257 ppb y 0.305 ppb, y 0.378 ppb, respectivamente. En el caso del 2020 las menores concentraciones se observaron en el mes de junio con valores de 0.192 para CCA, 0.301 para MER y 0.289 para SAG. Los mínimos observados en el mes de junio en ambos años se asocian a la temporada de lluvias, la cual ocasiona que se limpie la atmósfera debido al proceso de remoción húmeda. En el caso de los máximos se asocia a una disminución de la temperatura lo cual ocasiona que la capa límite sea más baja lo que conlleva a una mayor acumulación de contaminantes. Es importante mencionar que si se analiza la Figura 5.2 el mes de menor concentración para la MER es abril y diciembre y en SAG diciembre, sin embargo, esto se debe a que no se cuenta con el número suficiente de mediciones durante estos meses en las estaciones mencionadas.

### 5.2. Óxidos de nitrógeno.

En la Figura 5.3, se aprecia la serie de tiempo de la concentración de  $NO_X$  en ppb que se obtuvo con los promedios horarios para los años 2019 y 2020 de las estaciones de monitoreo la Merced, San Agustín y Centro de Ciencias de la Atmósfera. A partir de esta figura y usando la norma para el  $NO_2$  se pudo determinar que durante los dos años de estudio en la estación CCA no se rebasó ningún día el valor de la Norma Mexicana NOM-023-SSA1-1993 (210 ppb). En el caso de las estaciones MER y SAG se rebasó la norma en varias ocasiones en ambos años. Durante el 2019 se superó en 36 y 16 días en las estaciones MER y SAG, respectivamente; mientras, en 2020 se sobrepasó 26 y 10 días en MER y SAG, respectivamente (Tabla 5.2). Cabe mencionar que en el caso de la estación SAG se observó una gran ausencia de datos. El valor promedio de la concentración de  $NO_X$  en el 2019 fue de 29.870, 51.540 y 38.460 ppb para CCA, MER y SAG, respectivamente. Mientras que para el 2020 el valor promedio fue de 22.720, 43.690 y 32.400 ppb para CCA, MER y SAG, respectivamente.

## 5.2 Óxidos de nitrógeno.



**Fig. 5.3:** Series de tiempo de las concentraciones promedio horarias de los  $NO_x$  para los años 2019 y 2020 (con fechas clave de la pandemia). El valor límite especificado por la NOM-023 se representa como la línea fucsia.

En la estación CCA, las concentraciones máximas horarias se mantuvieron relativamente constantes puesto que en 2019 el valor máximo fue de 208 ppb (debajo de la norma) y para 2020 fue de 211 (una unidad por encima de la norma). Mientras que en los valores mínimos hubo una disminución de una unidad para el 2020 con respecto al 2019 (Tabla 5.3). Con esto, la estación CCA fue la que tuvo menores concentraciones y menor número de eventos en los cuales se rebasara la norma tanto en 2019 como en 2020. En la estación MER la diferencia entre los valores máximos fue de 10 unidades, viéndose disminuida en 2020 con 334 ppb con respecto a las 344 ppb de 2019; en ambos casos se rebasó la NOM-023 y fue esta estación la que tuvo mayores concentraciones de  $NO_x$  en el 2020. Los valores mínimos tuvieron un comportamiento similar al de la estación CCA



## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

---

Estación y año	$O_3$ [ppb]	$NO_x$ [ppb]	$PM_{2.5}$ [ $\mu g/m^3$ ]
CCA (2019)	100	0	10
CCA (2020)	112	1	1
MER (2019)	107	36	10
MER (2020)	72	26	2
SAG (2019)	16	16	3
SAG (2020)	11	10	0

**Tabla 5.2:** Número de días por año y por estación en los que se rebasó el valor de la norma mexicana para  $O_3$ ,  $NO_2$  y  $PM_{2.5}$

puesto que en 2020 la concentración mínima registrada fue una unidad menor que en 2019 (3 ppb y 4 ppb, respectivamente). Para la estación SAG, los valores máximos registrados fueron de 330 ppb en 2019 y 261 ppb en 2020, por lo que disminuyó en 69 unidades. Respecto a los valores mínimos, en 2020 hubo un ligero incremento (diferencia de 1 unidad) respecto a 2019 como se observa en la Tabla 5.3. Cabe mencionar que apesar de haberse observado un aumento y disminución en las concentraciones para las diferentes estaciones, ninguno de estos cambios fueron estadísticamente significativos con base en los resultados obtenidos de haber realizado la prueba U de Mann-Whitney.

Así mismo, las estaciones MER y SAG tuvieron una disminución del número de eventos en que se rebasó la NOM-023 durante el 2020 comparado con el 2019 (Tabla 5.2).

	CCA	MER	SAG
Máximo (2019)	208	344	330
Mínimo (2019)	2	4	1
Máximo (2020)	211	334	261
Mínimo (2020)	1	3	2

**Tabla 5.3:** Valores máximos y mínimos en ppb para el  $NO_x$  durante los años 2019 y 2020.

Respecto al ciclo diurno de los  $NO_x$ , se aprecia que en las tres estaciones durante ambos años el comportamiento fue bimodal con un pico de concentraciones alrededor de las 8:00 horas y otro a las 22:00 horas (Figura 5.4). Este comportamiento, al igual que en el caso del CO (Figura 5.2) se relaciona con las horas de mayor tránsito vehicular por el horario laboral. Además, al realizar una correlación entre estos dos contaminantes se encontró un valor de 0.871, 0.912 y 0.909 para CCA, MER y SAG, respectivamente.

En el caso del comportamiento mensual (Figura 5.4), se pudo apreciar que, tanto en el 2019 como en el 2020, durante el mes de enero se presentaron las concentraciones más altas de este contaminante, con valores de 40.920 ppb para CCA, 68.285 ppb para MER y 48.552 ppb para SAG en 2019 y de 34.874 ppb en el CCA, 0.608 ppb para MER y 46.643 ppb para SAG en 2020. Mientras, que el mes de menor concentración para el 2019, en las estaciones CCA, MER y SAG fue junio con valores de 21.779 ppb y 38.047 ppb, y 21.304 ppb, respectivamente. En el caso del 2020 las menores concentraciones se observaron en el mes de junio con valores de 12.953 ppb para CCA, 26.277 ppb para MER y 17.854 ppb para SAG. Los mínimos observados en el

## 5.2 Óxidos de nitrógeno.

---

mes de junio en ambos años se asocian a la temporada de lluvias, y los máximos se asocia a una disminución de la temperatura lo cual ocasiona que la capa limite sea más baja lo que conlleva a una mayor acumulación de contaminantes, caso similar a lo observado para el CO. Por otro lado, al observar la Figura 5.3 se aprecia que durante los meses de abril a junio se tiene una disminución en las concentraciones comparadas con las de 2019, lo cual puede deberse al igual que en el caso del CO, a la reducción de movilidad en la ciudad como consecuencia del inicio de la Fase 3 y el cese de actividades no esenciales.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

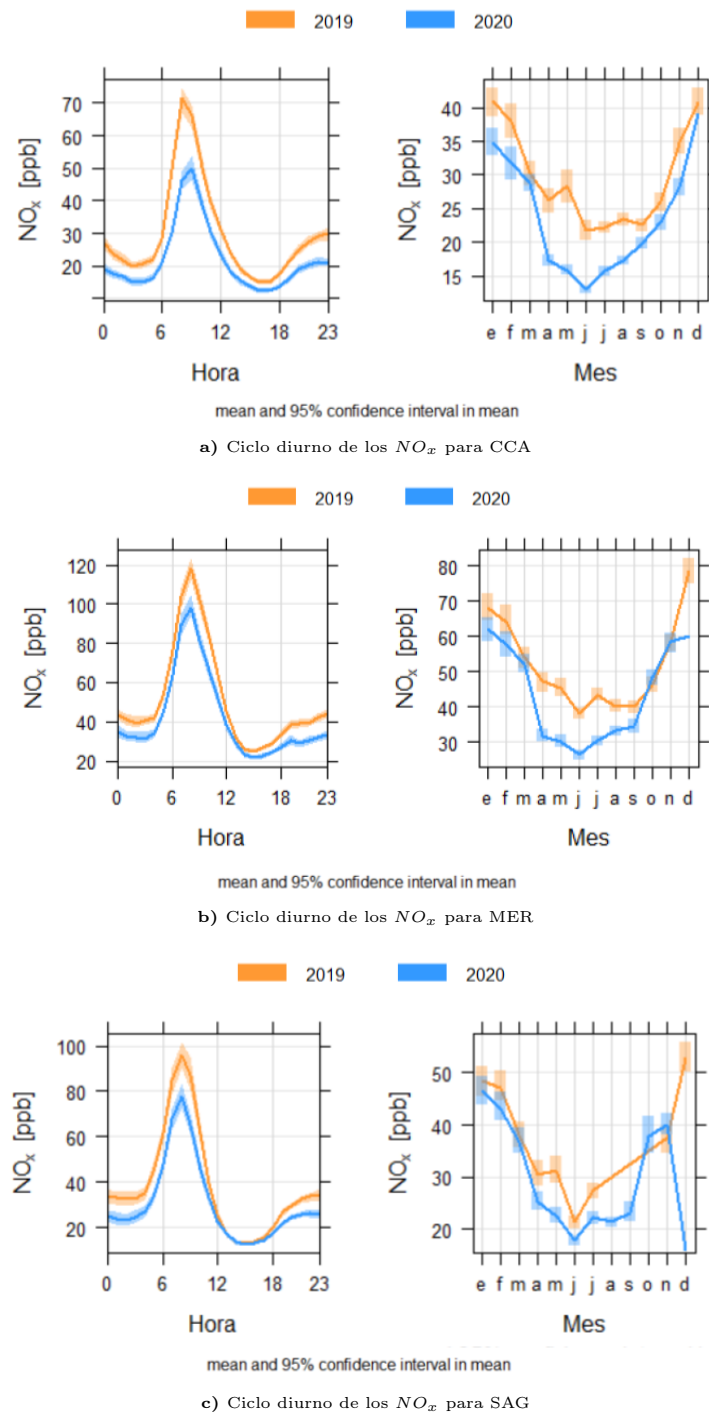
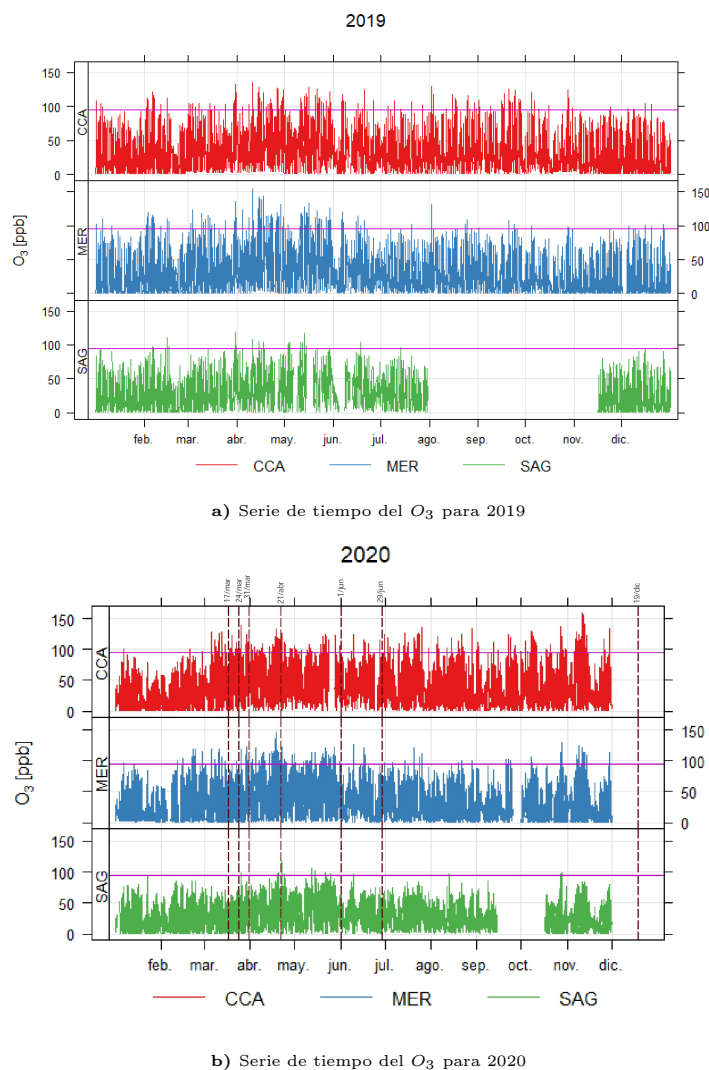


Fig. 5.4: Ciclos diarios de los  $NO_x$  para cada una de las estaciones en los años 2019 y 2020.

## 5.3. Ozono.

En la Figura 5.5 se aprecia la serie de tiempo de la concentración del ozono en ppb que se obtuvo con los promedios horarios para los años 2019 y 2020 de las estaciones de monitoreo la Merced, San Agustín y Centro de Ciencias de la Atmósfera. A partir de esta figura se pudo observar que en ambos años se rebasó el valor máximo permitido por la norma mexicana (95 ppb) en repetidas ocasiones. Durante el 2019 se superó en 107, 100 y 16 días en las estaciones CCA, MER y SAG, respectivamente; mientras, en 2020 se sobrepasó 112, 72 y 11 días en CCA, MER y SAG, respectivamente (Tabla 5.2). El valor promedio de la concentración de  $O_3$  en el 2019 fue de 32.550, 29.100 y 29.180 ppb para CCA, MER y SAG, respectivamente. Mientras que para el 2020 el valor promedio fue de 35.150, 29.650 y 26.070 ppb para CCA, MER y SAG, respectivamente.



**Fig. 5.5:** Series de tiempo de las concentraciones promedio horarias del  $O_3$  para los años 2019 y 2020 (con fechas clave de la pandemia). El valor límite especificado por la NOM-020 se representa como la línea fucsia.

Con la finalidad de observar si las concentraciones máximas y mínimas fueron similares entre el 2019 y 2020, se realizó una tabla comparativa (Tabla 5.4) en donde se observó que para las estaciones MER y SAG se mantuvieron casi constantes puesto que no presentaron una variación marcada. Sin embargo, sí se observó una disminución, la cual se asocia al aislamiento por el Covid 19. En el caso de la estación CCA se observó que el máximo valor fue mayor en 2020 con respecto al 2019, pero cuando se realizó el análisis de los  $NO_x$  y que se discutió anteriormente (Tabla 5.3) también se observó este aumento y dado que el ozono se forma fotoquímicamente a partir de los  $NO_x$ , se puede decir que este valor máximo tiene sentido.

	CCA	MER	SAG
Máximo (2019)	135	155	118
Mínimo (2019)	1	1	1
Máximo (2020)	159	146	116
Mínimo (2020)	1	1	1

**Tabla 5.4:** Valores máximos y mínimos en ppb para el  $O_3$  durante los años 2019 y 2020.

En el ciclo diurno del ozono (Figura 5.6) se observó que para las tres estaciones y en ambos años, el máximo de concentración se da entre las 14:00 y 16:00 horas. Este ciclo difiere de los mostrados anteriormente para el CO y  $NO_x$ , dado que el  $O_3$  es un contaminante secundario que se forma fotoquímicamente a partir de  $NO_X$ , CO y COVs, lo cual concuerda con lo observado por Peralta et al. 2021.

Respecto al comportamiento mensual (Figura 5.6), durante 2019 el mes que presentó la mayor concentración fue abril con 45.643 ppb para CCA, 45.334 ppb MER y para SAG fue mayo con 42.124 ppb. Durante 2020 los meses de máximas concentraciones fueron los mismos (abril y mayo) pero hubo un ligero aumento en las concentraciones promedio mensuales en la estación CCA (48.282 ppb y 48.026 ppb respectivamente). En caso de la estación MER hubo una disminución en el valor promedio de abril comparado con 2020 aunque no fue mayor a una unidad (44.614 ppb) y en mayo se obtuvieron 46.667 ppb, lo que representa un ligero aumento. Por otro lado, en la estación SAG la reducción comparada con los valores de 2019 fue mayor pues en abril se tuvieron 35.955 ppb y en mayo 38.995 ppb. Es importante aclarar que ninguno de los cambios observados visualmente representa un cambio estadísticamente significativo, esto, de acuerdo con la prueba U de Mann-Whitney.

Estos meses de máximas concentraciones en 2019 y 2020 corresponden a meses de secas cálidas donde por condiciones meteorológicas, se favorece la permanencia de altas concentraciones de ozono pues predomina la presencia de sistemas de alta presión que evitan la dispersión de contaminantes por medio de movimientos ascendentes que dan lugar a viento y lluvia. En el caso de las concentraciones mínimas, en el 2019 se encontraron dentro de la temporada de secas frías (diciembre) en el CCA y SAG con 24.634 ppb y 20.876 ppb de manera respectiva; en MER fue noviembre con 19.563 ppb. En el 2020 el mes con las mínimas concentraciones fue enero, en el CCA con un promedio de 22.726 ppb, en la MER 20.255 ppb y en SAG 20.543 ppb.

### 5.3 Ozono.

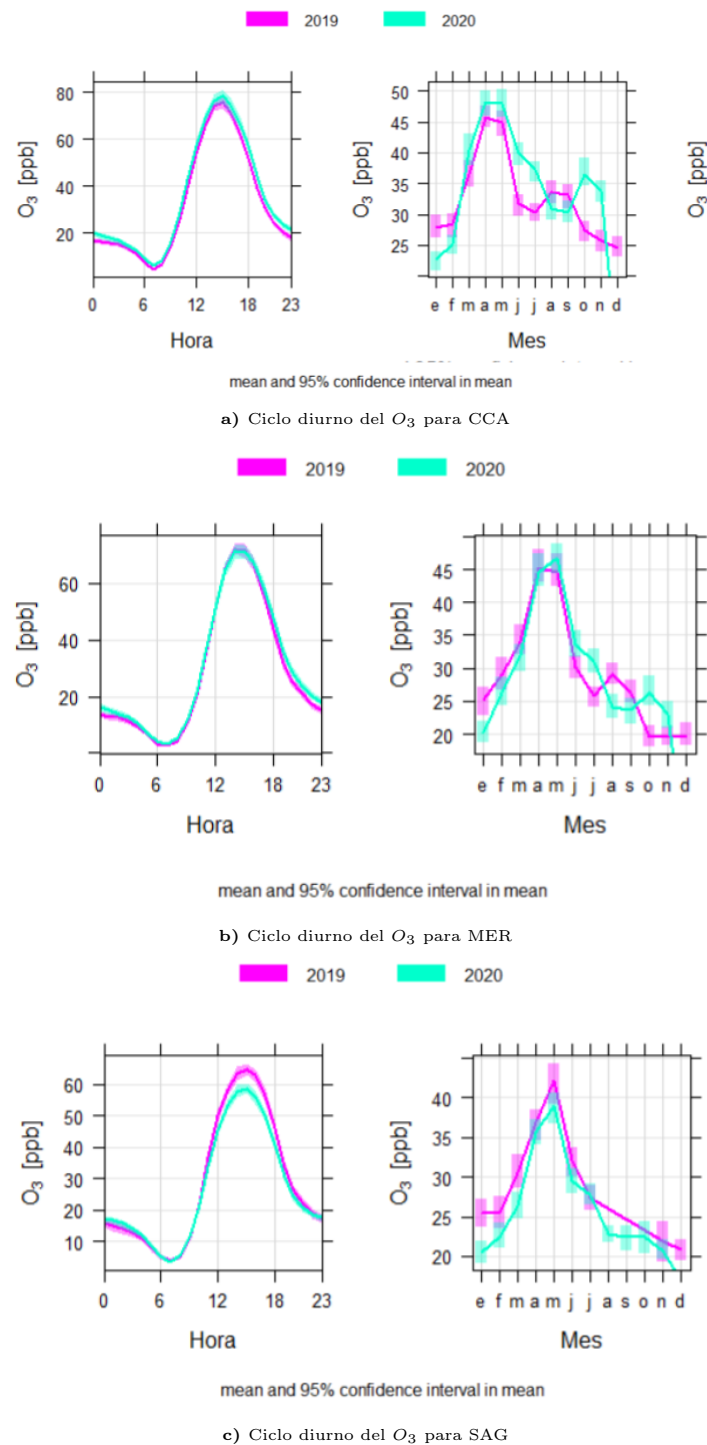


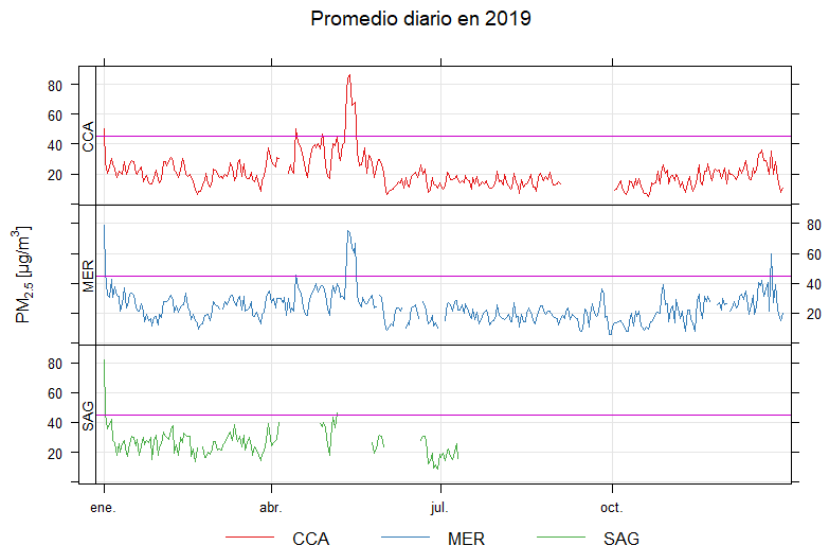
Fig. 5.6: Ciclos diarios del  $O_3$  para cada una de las estaciones en los años 2019 y 2020.

### 5.4. Material Particulado de $2.5 \mu m$

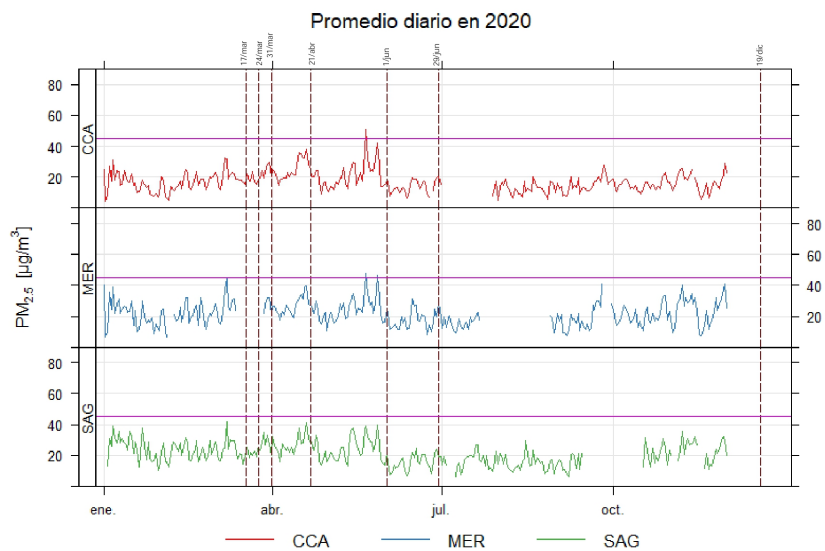
En la Figura 5.7 se aprecia la serie de tiempo de la concentración de las  $PM_{2.5}$  en  $\mu g/m^3$  que se obtuvo con los promedios diario para los años 2019 y 2020 de las estaciones de monitoreo la Merced, San Agustín y Centro de Ciencias de la Atmósfera. A partir de esta figura se pudo observar que en ambos años se rebasó el valor máximo permitido por la norma mexicana ( $45 \mu g/m^3$ ) en repetidas ocasiones. Durante el 2019 se superó en 10, 10 y 3 días en las estaciones CCA, MER y SAG, respectivamente; mientras, en 2020 se sobrepasó 1 y 2 días en CCA y MER, respectivamente (Tabla 5.2).

Durante 2019 en las estaciones CCA y MER se rebasó la norma durante 10 días del año, de los cuales, la mayoría ocurrió en el mes de mayo pues durante este mes hubo una contingencia ambiental extraordinaria ocasionada por incendios en el centro y sur del país (CAME, 2019). Mientras que en 2020 solo se registró un día en el CCA y dos en la MER comprendidos en el mismo mes (mayo). Esto, además representa una disminución en el número de veces que se rebasó la norma entre los meses de abril y mayo de 2019, lo cual se relaciona con la suspensión de actividades no esenciales y la fase 3 de la pandemia que incluyó medidas como el cierre de estaciones del Metro, Metrobús, Tren Ligerero y la implementación del programa Hoy No Circula de forma obligatoria para todos los vehículos sin importar su engomado. De esta forma, al verse muy reducida la movilidad desde el 23 de abril y durante el mes de mayo, significó una disminución en las concentraciones de  $PM_{2.5}$  puesto que sus principales fuentes de emisión se asocian a los autos por la combustión incompleta. En la estación SAG, durante 2019 se rebasó la norma en 3 ocasiones y en 2020 no hubo ningún día. Es importante mencionar que la serie de tiempo para el 2019 en el caso de SAG no contiene suficientes datos, lo cual no permite sacar conclusiones muy precisas acerca del comportamiento, pero se colocó con la finalidad de observar el comportamiento con la información que se tiene, tal como se aprecia en la Figura 5.7.

## 5.4 Material Particulado de 2.5 $\mu\text{m}$



a) Serie de tiempo del  $PM_{2.5}$  para 2019



b) Serie de tiempo del  $PM_{2.5}$  para 2020

**Fig. 5.7:** Series de tiempo de las concentraciones promedio diarias del  $PM_{2.5}$  para los años 2019 y 2020 (con fechas clave de la pandemia). El valor límite especificado por la NOM-025 se representa como la línea fucsia.

Por otro lado, al comparar los valores máximos horarios registrados, se obtuvo que en 2020 en las tres estaciones estos datos fueron más bajos comparados con los del 2019 (Tabla 5.5), esta disminución se asocia al aislamiento por el Covid-19.

En cuanto al ciclo diurno, durante 2019 y 2020 en la estación CCA se presentaron dos picos marcados en su comportamiento horario, uno alrededor de las 11:00 y 19:00 horas, el cual se puede asociar al transporte vehicular, mientras que en las estaciones MER y SAG se observó solo un máximo a las 10:00 horas (Figura 5.8), este comportamiento atípico indica que en estas



	CCA	MER	SAG
Máximo (2019)	138	165	177
Mínimo (2019)	1	1	1
Máximo (2020)	87	102	126
Mínimo (2020)	1	1	1

**Tabla 5.5:** Valores máximos y mínimos en  $\mu g/m^3$  para el  $PM_{2.5}$  durante los años 2019 y 2020.

estaciones hay un impacto de otras fuentes externas, para lo cual sería necesario hacer un análisis más detallado del comportamiento de los vientos en estas zonas.

En el comportamiento mensual, en las estaciones CCA y MER durante 2019 el mes con mayor concentración fue mayo con  $38.312 \mu g/m^3$  y  $36.318 \mu g/m^3$ , respectivamente. Mientras que en 2020 el mes de mayores concentraciones en el CCA fueron abril con  $22.884 \mu g/m^3$ , y mayo con  $22.251 \mu g/m^3$ , es decir, hubo una disminución en los valores promedio mensuales comparado con el 2019. En la estación MER, en 2020 los valores promedio mensuales más altos se registraron en marzo ( $27 \mu g/m^3$ ) y mayo ( $25.934 \mu g/m^3$ ), esto representa una disminución comparada con la media mensual obtenida en 2019. En la estación SAG, aunque se tiene una ausencia de datos de agosto a diciembre durante 2019, el mes con el máximo promedio fue abril ( $32.486 \mu g/m^3$ ), mientras que en 2020 los valores promedio mensuales más altos se registraron en enero ( $26.259 \mu g/m^3$ ) y abril con  $25.580 \mu g/m^3$ , lo cual implica a su vez una disminución en el valor promedio de abril (mes de máximas concentraciones en 2019). Estos cambios en los valores promedios mensuales durante abril y mayo principalmente se deben al cambio que hubo en la movilidad de la ciudad y, por consiguiente, en el tráfico que hubo durante estos meses que estuvo activa la Fase 3 de la pandemia. De acuerdo con TomTom Traffic Index en 2019 para la Ciudad de México (Figura 5.9), los meses de abril y mayo de 2020 fueron los que tuvieron menor carga vehicular, haciendo que las emisiones de  $PM_{2.5}$  asociadas a la combustión incompleta disminuyeran de forma considerable.

Cabe aclarar que al igual que en los contaminantes anteriormente descritos, ninguno de los cambios que aquí se aprecian, representan una variación estadísticamente significativa en el comportamiento de acuerdo con la prueba U de Mann-Whitney.

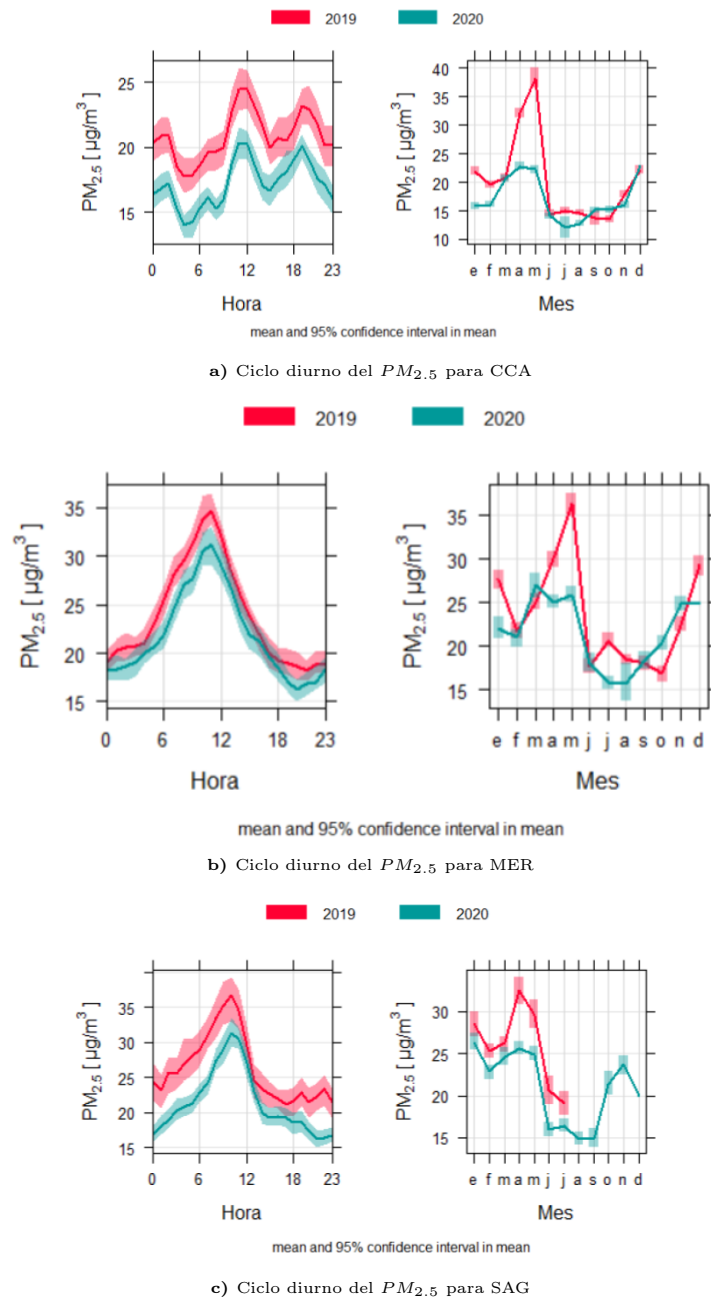
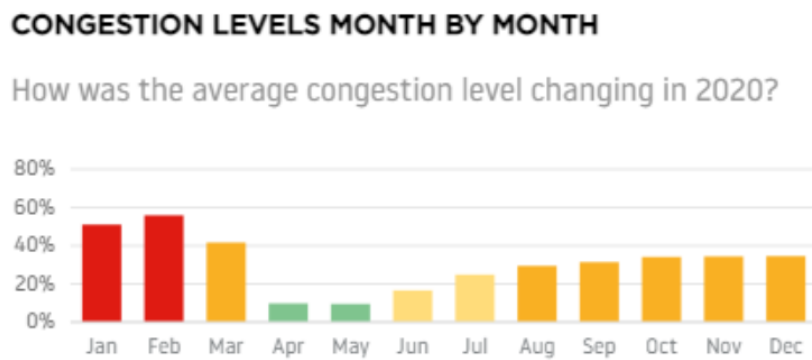


Fig. 5.8: Ciclos diarios del  $\text{PM}_{2.5}$  para cada una de las estaciones en los años 2019 y 2020.



**Fig. 5.9:** Saturación vehicular promedio mensual en 2020 en la Ciudad de México. Gráfico elaborado por TomTom Traffic Index ([https://www.tomtom.com/en\\_gb/traffic-index/mexico-city-traffic/](https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index/mexico-city-traffic/))

## Conclusiones

---

Durante la pandemia ocurrida en 2020 a causa del Covid-19, en las estaciones CCA, MER y SAG se observaron cambios en las concentraciones de  $NO_x$ ,  $PM_{2.5}$  y CO con respecto a los valores que se obtuvieron en el año 2019. Sin embargo, estos cambios en su mayoría fueron disminuciones y por lo tanto una mejora en la calidad del aire, pero no lo suficientemente grandes como para representar una diferencia significativa respecto a las concentraciones del 2019. Sin embargo se debe tomar esta conclusión con mucha precaución ya que para tener resultados más confiables se necesita un estudio más exhaustivo abarcando al menos 5 años anteriores al 2020 y considerando más estaciones de monitoreo alrededor del área metropolitana de la Ciudad de México para evitar a su vez la ausencia de tantos datos (como en el caso de SAG en los  $PM_{2.5}$ ) y cubrir más área de la Ciudad.

Respecto al  $O_3$ , a diferencia de los demás contaminantes, se apreció un aumento con respecto a las concentraciones de 2019, aunque, de nueva cuenta no fueron significativos, esto es reflejo de la complejidad de estudio de este contaminante pues posee diferentes fuentes de emisión, tanto primarias como es el caso de las reacciones de fotólisis, como secundarias relacionadas con precursores como los COVs y el  $NO_X$ .

Con respecto al cumplimiento de las normas mexicanas se puede concluir que en la mayoría de los contaminantes se cumplen. Sin embargo, en el caso del ozono durante los años de estudios se presentaron muchos días que incumplieron la norma y esto confirma el porqué esta norma se tuvo que actualizar.

En el año 2020 es posible concluir que la estación que presentó mayor concentración de contaminantes fue MER, lo cual se asocia a que existe un mayor flujo vehicular en esta zona comparada con las otras de estudio.



## Bibliografía

---

- Ahrens, D. (2009). *Meteorology today an introduction to weather climate and the environment*. Cengage Learning.
- America's Children and the Environment. *Criteria Air Pollutants* (inf. téc.). (2015). Environmental Protection Agency.
- CAMe. (2019). Se activa contingencia ambiental atmosférica extraordinaria por partículas  $PM_{2.5}$  y ozono en la ZMVM. <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/comunicado-came-027-se-activa-contingencia-extraordinaria-pm2-5-y-ozono-14mayo2019-v1-1.pdf>
- Chow, J. C., Watson, J. G., Mauderly, J. L., Costa, D. L., Wyzga, R. E., Vedal, S., Hidy, G. M., Altshuler, S. L., Marrack, D., Heuss, J. M., Wolff, G. T., III, C. A. P. & Dockery, D. W. (2006). Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, **56**(10), 1368-1380. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464545>
- COFEPRIS. (2017). Clasificación de los contaminantes del aire ambiente. <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/2-clasificacion-de-los-contaminantes-del-aire-ambiente>
- Crespo, P. M. (2017). *Análisis del depósito atmosférico y caracterización experimental de partículas suspendidas en la Ciudad de México*. (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Puebla.
- EPA. (2016). Centro de Información sobre Contaminación de Aire (CICA) para la frontera entre EE. UU. México. [https://www3.epa.gov/ttnecat1/cica/airq\\_s.html](https://www3.epa.gov/ttnecat1/cica/airq_s.html)
- Giordano, S. (2019). *Estudio de las concentraciones de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos en Mérida, Yucatán*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- IDEAM. (2022). Contaminación Atmosférica. <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/contaminacion-atmosferica>
- INECC. (2007). Calidad del aire y efectos a la salud: Normas de calidad del aire. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/233/cap4.html>
- Jacobson, M. (2002). *Atmospheric Pollution: History, science and regulation*. Cambridge.
- Levy, R. J. (2015). Carbon monoxide pollution and neurodevelopment: A public health concern. *Neurotoxicology and Teratology*, **49**, 31-40. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ntt.2015.03.001>
- Lutgens, E. T. F. (2005). *Ciencias de la Tierra. Una Introducción a la geología física* (8va Edición). Pearson Educación.
- Manahan, S. (2007). *Introducción a la química ambiental*. Reverté S.A.

- Montero, C. (2011). *Pronóstico de la calidad del aire en el área Metropolitana de la Ciudad de México a través del análisis de las Series de tiempo de los componentes del IMECA*. (Tesis de maestría). Universidad Iberoamericana.
- Murillo, L. C. (2017). *Medición de partículas submicrométricas utilizando un clasificador electrostático y un contador de partículas de condensación* (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Murillo-Tovar, M. A. (2012). *Optimización de las condiciones analíticas para la determinación simultánea de n-alcanos, hidrocarburos aromáticos policíclicos y sus derivados oxigenados en las aeropartículas  $\leq 2.5\mu\text{m}$*  (Tesis doctoral). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Peralta, O., Ortínez-Alvarez, A., Torres-Jardón, R., Suárez-Lastra, M., Castro, T. & Ruíz-Suárez, L. G. (2021). Ozone over Mexico City during the COVID-19 pandemic. *Science of The Total Environment*, **761**, 143183. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143183>
- Potrillo, A. K. (2017). *Diagnóstico de la calidad del aire en el sector noroeste de la zona metropolitana de Aguascalientes*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Querol, X. (Ed.). (2018). *Air Quality in Cities. A Global Challenge*. Naturgy Foundation.
- Salcedo, D., Alvarez-Ospina, H., Peralta, O. & Castro, T. (2018). PM1 Chemical Characterization during the ACU15 Campaign, South of Mexico City. *Atmosphere*, **9**(6). <https://doi.org/10.3390/atmos9060232>
- SEDEMA. (2016). *Calidad del aire en la Ciudad de México. Informe anual 2015* (inf. téc.). Dirección General de Calidad del Aire.
- SEDEMA. (2020). *Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2018* (inf. téc.). Dirección General de Calidad del Aire.