



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA Y CAMBIO CLIMÁTICO

“EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN A MULTI-CONTAMINANTES EN LA
CIUDAD DE MÉXICO”

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA

ANDRÉS MENDOZA FRÍAS

TUTOR PRINCIPAL

Dr. Oscar Augusto Peralta Rosales
Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, UNAM

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR

Dra. Karen Elizabeth Nava Castro (Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, UNAM)

Dr. Iván Yassmany Hernández Paniagua (Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, UNAM)

Dr. José Abraham Ortíz Alvarez (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático)

Dra. Martha Patricia Sierra Vargas (Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias Ismael Cosío Villegas)

Ciudad Universitaria, CDMX. Abril 2024.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos

Dr. Oscar Peralta, gracias por su mentoría para el desarrollo del presente trabajo; por su paciencia y tiempo para resolver todas mis dudas. Muchísimas gracias por todo el apoyo brindado no solo en lo académico.

Al Dr. Abraham Ortinez, por contagiarme su pasión por este tema y los aportes realizados; pero sobre todo por su confianza.

Dra. Karen Nava, le agradezco la disposición que siempre tuvo para resolver mis dudas y orientarme sobre los temas desconocidos para mí.

A la Dra. Patricia Sierra y al Dr. Iván Hernández, les agradezco todas las aportaciones realizadas a este trabajo, las cuales, lo enriquecieron y mejoraron.

A la Dra. Christina Siebe y todo el personal del Posgrado en Ciencias de la Tierra, por su apoyo y orientación.

A mis profesores por el conocimiento compartido y su aporte a mi formación. Al Dr. Víctor Almanza por su magnífico curso y su disposición para siempre aportar más a mi formación.

A mi familia por ser mi motor y mi apoyo. A mi madre por ser mi mayor apoyo y el mejor ejemplo en mi vida. Gracias, hermanos, por su cariño.

A mis amigos que hicieron más sencillo el proceso. Gracias por estar en todo momento. A Mariana y Andrea por su ayuda y asesoría para la conclusión de este trabajo.

Por último, al apoyo recibido por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Resumen

En el presente estudio se realizó la evaluación de la exposición ambiental a multi-contaminantes atmosféricos en la Ciudad de México en el corto y largo plazo para los años 2019, 2020 y 2021 mediante el método del trapecio. Para este fin, se emplearon los datos obtenidos por la Dirección de Monitoreo de la CDMX.

Se consideraron las estaciones de monitoreo Centro de Ciencias de la Atmósfera, Facultad de Estudios Superiores Acatlán, Merced, Nezahualcóyotl, Santa Fe, Tlalnepantla y UAM Xochimilco. En estos sitios se tomaron en consideración las concentraciones horarias de monóxido de carbono (CO), ozono (O₃), dióxido de nitrógeno (NO₂), monóxido de nitrógeno (NO) y dióxido de azufre (SO₂) y el material particulado menor a 2.5 micras (PM_{2.5}).

Se identificó un descenso en las concentraciones en todos los contaminantes analizados a lo largo de las estaciones de monitoreo analizadas para los años 2020 y 2021 respecto al 2019 asociado a la instauración de medidas de confinamiento para evitar la propagación de la COVID-19.

El análisis de varianza mostró diferencias estadísticamente significativas en las concentraciones entre los años de estudio (2019, 2020 y 2021) para los contaminantes gaseosos y entre el año 2019 con los años posteriores para el PM_{2.5}. Respecto a las estaciones, se encontraron diferencias significativas indicando una disparidad en las cantidades de contaminantes en gramos inhalados en los diferentes sitios evaluados.

Las estaciones Merced y Nezahualcóyotl presentaron las concentraciones más altas para contaminantes gaseosos y PM_{2.5} respectivamente lo que se traduce en un mayor riesgo a la salud para los habitantes de dichas regiones de la ciudad a causa de una mayor inhalación de contaminantes. La estación Santa Fe presentó los valores más bajos a lo largo del estudio para ambas especies de contaminantes.

Tabla de contenido

Capítulo 1. Introducción	1
Capítulo 2. Marco Teórico	2
2.1 Contaminación del aire	2
2.2 Exposición.....	3
2.2.1 Exposoma	4
2.2.2 Efectos de los contaminantes atmosféricos en la salud	5
2.3 Estudios previos	5
2.3.1 Estudios en CDMX	5
2.3.2 Estudios con co-exposición	7
2.4 Contaminación y mecanismos de afección a la salud.....	8
2.4.1 Inhalación de gases (daño inducido por la exposición a ozono)	8
2.4.2 Inhalación de partículas	9
Capítulo 3. Objetivos e hipótesis	11
3.1 Objetivos	11
3.2 Hipótesis.....	11
Capítulo 4. Métodos y análisis	12
4.1 Datos empleados	12
4.1.1 Selección de datos.....	13
4.1.2 Limpieza y depuración de series de datos	14
4.1.3 Conversión de unidades de concentración.....	14
4.2 Características de las estaciones consultadas	15
4.2.1 Estación Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA)	16
4.2.2 Estación Facultad de Estudios Superiores Acatlán (FAC)	16
4.2.3 Estación Merced (MER)	17
4.2.4 Estación Nezahualcóyotl (NEZ)	18
4.2.5 Estación Santa Fe (SFE).....	19
4.2.6 Estación Tlalnepantla (TLA).....	20
4.2.7 Estación Universidad Autónoma de México, Xochimilco (UAX)	21
4.3 Cálculo del área bajo la curva	22
4.4 Cálculo de exposición diaria y anual.....	23
4.4.1 Exposición diaria (corto plazo).....	23
4.4.2 Exposición anual (largo plazo)	24
4.5 Análisis de varianza	25
4.6 Cálculo de la dosis de inhalación	26
4.7 Cálculo de población expuesta	27
Capítulo 5. Resultados	28
5.1 Dosis de exposición ambiental diaria.....	28
5.1.1 Perfiles diarios año 2019 (exposición 24 h).....	28
5.1.2 Perfiles diarios año 2020 (exposición 24 h).....	32
5.1.3 Perfiles diarios año 2021 (exposición 24 h).....	35
5.2 Exposición ambiental anual	38

5.3 Análisis de varianza por años y estaciones.....	45
5.3.1 Análisis de varianza por estación	45
5.4 Dosis inhalada diaria y anual	47
5.4 Densidad poblacional.....	51
Capítulo 6. Discusión	54
6.1 Análisis de variancia	54
6.1.1 Análisis de varianza en gases	54
6.1.2 Análisis de varianza en PM _{2.5}	56
6.2 Diferencias porcentuales en la exposición ambiental diaria entre los años de estudio.	56
6.3 Exposición ambiental total durante los años 2019, 2020 y 2021	58
6.4 Dosis inhalada y densidad poblacional.....	61
6.5 Comparativa entre concentraciones ambientales en CDMX y legislación vigente (NOM y OMS)	64
6.6 Posibles efectos de la exposición por zona y grupo de edad.....	66
Capítulo 7. Conclusiones	70
7.1 Recomendaciones	72
Capítulo 8. Referencias	74
Capítulo 9. Anexos.....	83
Anexo A. Perfiles diarios	83
Anexo B. Perfiles anuales.....	93
Anexo C	103
Anexo D	103

Índice de figuras

Figura 1. Desarrollo de la COVID-19 en la Ciudad de México.....	13
Figura 2. Distribución de las estaciones de la RAMA	15
Figura 3. Entorno estación CCA.	16
Figura 4. Entorno estación FAC.....	17
Figura 5. Entorno estación MER.....	18
Figura 6. Entorno estación NEZ.....	19
Figura 7. Entorno estación SFE.....	20
Figura 8. Entorno estación TLA.....	21
Figura 9. Entorno estación UAX.....	22
Figura 10. Perfil de exposición ambiental diaria para gases en la estación Tlalnepantla, 2019.....	29

Figura 11. Perfil de exposición ambiental diaria para PM _{2.5} Nezahualcóyotl, 2019.	29
Figura 12. Ubicación de las estaciones de monitoreo empleadas y magnitud de la exposición ambiental diaria para gases, 2019.	31
Figura 13. Ubicación de las estaciones de monitoreo empleadas y magnitud de la exposición ambiental diaria para PM _{2.5} .	31
Figura 14. Perfil de exposición ambiental diario para gases en la estación Merced, 2020.	32
Figura 15. Perfil de exposición ambiental diario para PM _{2.5} en la estación Nezahualcóyotl, 2020.	33
Figura 16. Ubicación de las estaciones de monitoreo empleadas y magnitud de la exposición ambiental diaria para gases, 2020.	34
Figura 17. Ubicación de las estaciones de monitoreo empleadas y magnitud de la exposición ambiental diaria para PM _{2.5} , 2020.	35
Figura 18. Perfil diurno para gases en la estación Merced, 2021.	36
Figura 19. Perfil diurno para PM _{2.5} en la estación Nezahualcóyotl, 2021.	36
Figura 20. Ubicación de las estaciones de monitoreo empleadas y magnitud de la exposición ambiental diaria para gases, 2021.	37
Figura 21. Ubicación de las estaciones de monitoreo empleadas y magnitud de la exposición ambiental diaria para PM _{2.5} , 2021.	38
Figura 22. Perfil de exposición ambiental anual para la estación TLA, 2019.	39
Figura 23. Perfil de exposición ambiental anual a PM _{2.5} , 2019.	40
Figura 24. Ubicación de las estaciones de monitoreo empleadas y magnitud de la exposición ambiental anual para gases, 2019.	41
Figura 25. Ubicación de las estaciones de monitoreo empleadas y magnitud de la exposición ambiental anual para gases, 2020.	42
Figura 26. Ubicación de las estaciones de monitoreo empleadas y magnitud de la exposición ambiental anual para gases, 2021.	42
Figura 27. Ubicación de las estaciones de monitoreo empleadas y magnitud de la exposición ambiental anual para PM _{2.5} , 2019.	43
Figura 28. Ubicación de las estaciones de monitoreo empleadas y magnitud de la exposición ambiental anual para PM _{2.5} , 2020.	44
Figura 29. Ubicación de las estaciones de monitoreo empleadas y magnitud de la exposición ambiental anual para PM _{2.5} , 2021.	44
Figura 30. Dispersión y resultados del análisis de varianza para gases	46
Figura 31. Dispersión y resultados del análisis de varianza para PM _{2.5} .	47
Figura 32. Ubicación de estaciones y radio de incidencia	51
Figura 33. Población total estimada dentro de área de incidencia por estación.	52
Figura 34. Población estimada por sector dentro del área de incidencia por estación	53
Figura 35. Exposición ambiental a gases para el periodo 2019-2021.	59
Figura 36. Exposición ambiental a PM _{2.5} para el periodo 2019-2021.	60
Figura 37. Diferencias porcentuales en la inhalación de gases respecto a estación SFE.	62

Figura 38. Diferencias porcentuales en la inhalación de PM _{2.5} respecto a estación SFE.....	64
Figura 39. Perfil de exposición ambiental diaria a gases CCA 2019.....	83
Figura 40. Perfil de exposición ambiental diaria a gases CCA 2020.....	83
Figura 41. Perfil de exposición ambiental diaria a PM _{2.5} CCA 2019.....	83
Figura 42. Perfil de exposición ambiental diaria a PM _{2.5} CCA 2020.....	83
Figura 43. Perfil de exposición ambiental diaria a gases CCA 2021.....	84
Figura 44. Perfil de exposición ambiental diaria a gases MER 2019.....	84
Figura 45. Perfil de exposición ambiental diaria a PM _{2.5} CCA 2021.....	84
Figura 46. Perfil de exposición ambiental diaria a PM _{2.5} MER 2019.....	84
Figura 47. Perfil de exposición ambiental diaria a gases MER 2020.....	85
Figura 48. Perfil de exposición ambiental diaria a gases MER 2021.....	85
Figura 49. Perfil de exposición ambiental diaria a PM _{2.5} MER 2020.....	85
Figura 50. Perfil de exposición ambiental diaria a PM _{2.5} MER 2021.....	85
Figura 51. Perfil de exposición ambiental diaria a gases NEZ 2019.....	86
Figura 52. Perfil de exposición ambiental diaria a gases NEZ 2020.....	86
Figura 53. Perfil de exposición ambiental diaria a PM _{2.5} NEZ 2019.....	86
Figura 54. Perfil de exposición ambiental diaria a PM _{2.5} NEZ 2020.....	86
Figura 55. Perfil de exposición ambiental diaria a gases NEZ 2021.....	87
Figura 56. Perfil de exposición ambiental diaria a gases SFE 2019.....	87
Figura 57. Perfil de exposición ambiental diaria a PM _{2.5} NEZ 2021.....	87
Figura 58. Perfil de exposición ambiental diaria a PM _{2.5} NEZ 2021.....	87
Figura 59. Perfil de exposición ambiental diaria a gases SFE 2020.....	88
Figura 60. Perfil de exposición ambiental diaria a gases SFE 2021.....	88
Figura 61. Perfil de exposición ambiental diaria a PM _{2.5} SFE 2020.....	88
Figura 62. Perfil de exposición ambiental diaria a PM _{2.5} SFE 2021.....	88
Figura 63. Perfil de exposición ambiental diaria a gases TLA 2019.....	89
Figura 64. Perfil de exposición ambiental diaria a gases TLA 2020.....	89
Figura 65. Perfil de exposición ambiental diaria a PM _{2.5} TLA 2019.....	89
Figura 66. Perfil de exposición ambiental diaria a PM _{2.5} TLA 2020.....	89
Figura 67. Perfil de exposición ambiental diaria a gases TLA 2021.....	90
Figura 68. Perfil de exposición ambiental diaria a gases UAX 2019.....	90
Figura 69. Perfil de exposición ambiental diaria a PM _{2.5} TLA 2021.....	90
Figura 70. Perfil de exposición ambiental diaria a PM _{2.5} UAX 2019.....	90
Figura 71. Perfil de exposición ambiental diaria a gases UAX 2020.....	91
Figura 72. Perfil de exposición ambiental diaria a gases UAX 2021.....	91
Figura 73. Perfil de exposición ambiental diaria a PM _{2.5} UAX 2021.....	91
Figura 74. Perfil de exposición ambiental diaria a PM _{2.5} UAX 2021.....	91
Figura 75. Perfil de exposición ambiental diaria a gases FAC 2019.....	92
Figura 76. Perfil de exposición ambiental diaria a gases FAC 2021.....	92
Figura 77. Perfil de exposición ambiental diaria a gases FAC 2020.....	92
Figura 78. Perfil de exposición ambiental anual a gases CCA 2019.....	93
Figura 79. Perfil de exposición ambiental anual a gases CCA 2020.....	93
Figura 80. Perfil de exposición ambiental anual a PM _{2.5} CCA 2019.....	93

Figura 81. Perfil de exposición ambiental anual a PM _{2.5} CCA 2020.....	93
Figura 82. Perfil de exposición ambiental anual a gases CCA 2021.....	94
Figura 83. Perfil de exposición ambiental anual a gases MER 2019.....	94
Figura 84. Perfil de exposición ambiental anual a PM _{2.5} CCA 2021.....	94
Figura 85. Perfil de exposición ambiental anual a PM _{2.5} MER 2019.....	94
Figura 86. Perfil de exposición ambiental anual a gases MER 2020.....	95
Figura 87. Perfil de exposición ambiental anual a gases MER 2021.....	95
Figura 88. Perfil de exposición ambiental anual a PM _{2.5} MER 2020.....	95
Figura 89. Perfil de exposición ambiental anual a PM _{2.5} MER 2021.....	95
Figura 90. Perfil de exposición ambiental anual a gases NEZ 2019.....	96
Figura 91. Perfil de exposición ambiental anual a gases NEZ 2020.....	96
Figura 92. Perfil de exposición ambiental anual a PM _{2.5} NEZ 2019.....	96
Figura 93. Perfil de exposición ambiental anual a PM _{2.5} NEZ 2020.....	96
Figura 94. Perfil de exposición ambiental anual a gases NEZ 2021.....	97
Figura 95. Perfil de exposición ambiental anual a gases SFE 2019.....	97
Figura 96. Perfil de exposición ambiental anual a PM _{2.5} NEZ 2021.....	97
Figura 97. Perfil de exposición ambiental anual a PM _{2.5} SFE 2019.....	97
Figura 98. Perfil de exposición ambiental anual a gases SFE 2020.....	98
Figura 99. Perfil de exposición ambiental anual a gases SFE 2021.....	98
Figura 100. Perfil de exposición ambiental anual a PM _{2.5} SFE 2020.....	98
Figura 101. Perfil de exposición ambiental anual a PM _{2.5} SFE 2021.....	98
Figura 102. Perfil de exposición ambiental anual a gases TLA 2019.....	99
Figura 103. Perfil de exposición ambiental anual a gases TLA 2020.....	99
Figura 104. Perfil de exposición ambiental anual a PM _{2.5} TLA 2019.....	99
Figura 105. Perfil de exposición ambiental anual a PM _{2.5} TLA 2020.....	99
Figura 106. Perfil de exposición ambiental anual a gases TLA 2021.....	100
Figura 107. Perfil de exposición ambiental anual a gases UAX 2019.....	100
Figura 108. Perfil de exposición ambiental anual a PM _{2.5} TLA 2021.....	100
Figura 109. Perfil de exposición ambiental anual a PM _{2.5} UAX 2019.....	100
Figura 110. Perfil de exposición ambiental anual a gases UAX 2020.....	101
Figura 111. Perfil de exposición ambiental anual a gases UAX 2021.....	101
Figura 112. Perfil de exposición ambiental anual a PM _{2.5} UAX 2020.....	101
Figura 113. Perfil de exposición ambiental anual a PM _{2.5} UAX 2021.....	101
Figura 114. Perfil de exposición ambiental anual a gases FAC 2019.....	102
Figura 115. Perfil de exposición ambiental anual a gases FAC 2021.....	102
Figura 116. Perfil de exposición ambiental anual a gases FAC 2020.....	102

Índice de tablas

Tabla 1. Valores guía de exposición ambiental a contaminantes (SEDEMA).....	6
Tabla 2. Grupos poblacionales y tasas de inhalación de acuerdo con actividad diaria.....	26
Tabla 3. Representatividad de contaminantes analizados.....	27
Tabla 4. Exposición ambiental diaria para el año 2019 en las estaciones analizadas.....	30
Tabla 5. Exposición ambiental diaria para el año 2020 en las estaciones analizadas.....	33
Tabla 6. Exposición ambiental diaria para el año 2021 en las estaciones analizadas.....	37
Tabla 7 . Exposición ambiental anual 2019-2021.....	39
Tabla 8. Valores de p de prueba Kruskal-Wallis.....	45
Tabla 9. Carga diaria de contaminantes gaseosos por grupo poblacional.....	49
Tabla 10. Carga diaria de contaminantes particulados menor a 2.5 µm por grupo poblacional	49
Tabla 11. Carga anual de contaminantes gaseosos por grupo poblacional.....	50
Tabla 12. Carga anual de contaminantes particulados menor a 2.5 µm por grupo poblacional	50
Tabla 13. Exposición ambiental promedio diaria a gases en [µg·día/m ³] y diferencia porcentual entre el año 2019 y los años 2020 y 2021.	57
Tabla 14. Exposición ambiental promedio diaria a PM _{2.5} en [µg·día/m ³] y diferencia porcentual entre el año 2019 y los años 2020 y 2021.	58
Tabla 15. Diferencia porcentual en exposición ambiental anual para gases 2019-2021 con referencia a la estación SFE.	58
Tabla 16. Diferencia porcentual en exposición ambiental anual para PM _{2.5} 2019-2021 con referencia a la estación SFE.	60
Tabla 17. Desglose de población por estación dentro del radio de incidencia	103
Tabla 18. Tabla con valores de prueba de Dunn por pares para gases.....	103
Tabla 19. Tabla con valores de prueba de Dunn por pares para el PM _{2.5}	103

Capítulo 1. Introducción

El análisis de contaminantes atmosféricos se ha convertido en una práctica común dentro de las redes de monitoreo y en la investigación. El método más común implica determinar las concentraciones de éstos a lo largo del tiempo y asociarlo a incrementos o decrementos en la tasa de incidencia de diversas enfermedades. Sin embargo, determinar los efectos que tiene un contaminante por sí solo es complejo, ya que los contaminantes atmosféricos se encuentran dentro de una mezcla compleja de co-contaminantes (Dominici et al., 2003). Existe otra perspectiva para el análisis de las concentraciones de contaminantes atmosféricos que consiste en definir la exposición total como la suma de varios contaminantes atmosféricos. Esto puede representar una manera adecuada para establecer parámetro comparativo entre contaminantes y salud.

La exposición se define como el contacto de un agente químico, físico o biológico con el límite exterior de un organismo (EPA, 1992), durante un período de tiempo puede representarse mediante un perfil de concentración de exposición dependiente del tiempo, siendo el área bajo la curva la magnitud de la exposición en el tiempo (NRC, 1991). En ese sentido, utilizar un simple cálculo mediante la regla trapecio nos permitirá conocer y comparar la toxicidad potencial acumulada de los contaminantes, analizando el perfil de los contaminantes a lo largo del tiempo, analizando la exposición en función de la concentración total de contaminantes y no del umbral límite.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Contaminación del aire

La contaminación del aire se refiere a la modificación de las características naturales de la atmósfera por un agente químico, físico o biológico (WHO, 2022). La contaminación del aire incluye una mezcla de sustancias que representan un peligro para la salud humana generadas por fuentes tanto antrópicas como naturales (NIEHS, 2022). Dentro de las fuentes naturales se encuentran el humo producido por los incendios forestales, la emisión de partículas y gases dentro de las erupciones volcánicas, entre otras. Las emisiones de vehículos, la quema de combustibles para la industria y producción de energía constituyen las principales fuentes de origen antrópico. El término contaminación del aire ambiente se emplea para describir la contaminación del aire en ambientes al aire libre (PAHO, 2018).

La contaminación del aire es un problema ambiental de interés mundial. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (WHO, por sus siglas en inglés), durante el año 2016, 92 % de la población mundial vivía en lugares donde las concentraciones superaban las directrices de calidad del aire dictadas por esta organización, para el año 2019 la cifra aumentó a 99 %. Además, es la cuarta causa de muertes prematuras a nivel mundial por detrás de la hipertensión, tabaquismo y desnutrición (So et al., 2022). La contaminación atmosférica global se considera un problema internacional (Manisalidis,2020) principalmente en los países en vías de desarrollo ya que son los que más expuestos están ante este problema derivado de la sobrepoblación y el crecimiento descontrolado de las urbes. Se estima que derivado de la contaminación antropogénica, mueren alrededor de 9 millones de personas al año (WHO,2018)

La calidad del aire es un término que describe las condiciones presentes en la atmósfera en un sitio determinado y es un indicador del grado de afectación de los contaminantes atmosféricos sobre dicho sitio. Dentro de las determinaciones de la calidad del aire se encuentran los contaminantes criterio que son las especies

químicas empleadas para expresar la calidad del aire. En este grupo se encuentran los siguientes contaminantes: ozono (O_3), material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2) y dióxido de nitrógeno (NO_2) (EPA,2021). En México, además de las especies mencionadas por la EPA, se cuantifica la concentración de óxido de nitrógeno (NO) que en conjunto con el NO_2 constituyen los NO_x .

2.2 Exposición

La exposición se define como el contacto de un agente químico, físico o biológico con el límite exterior de un organismo (EPA, 1992), durante un período de tiempo puede representarse mediante un perfil de concentración de exposición dependiente del tiempo, siendo el área bajo la curva la magnitud de la exposición en el tiempo (NRC, 1991).

Esta está determinada por la interacción entre la población y la concentración del contaminante. La concentración se refiere a la cantidad de un contaminante que existe en un espacio específico (EPA, 2019). Para hablar de una exposición, es necesaria la presencia de un individuo o población dentro de la zona de estudio. En el caso de la exposición a contaminantes atmosféricos la ruta de transporte es el aire y la vía de exposición es mediante el proceso de la inhalación. (INE, 2011)

La exposición humana a la contaminación ambiente o exterior es una función de la composición y magnitud de la contaminación del aire en combinación con los patrones de actividad humana (EPA, 2022). Los datos de concentración ambiental no representan completamente las exposiciones humanas ya que únicamente determinan la calidad del aire en ubicaciones exteriores.

La exposición personal puede ser definida como la medición de uno o más contaminantes de interés mediante un monitor o muestreador ubicado en un punto cercano a la zona de respiración de una persona mientras se realiza la toma de

muestras (Braniš, 2010). Dicha exposición incluye tanto contaminantes del exterior como de ambientes intramuro, así como contaminantes generados por las propias actividades de la persona (Steinle et al., 2011).

2.2.1 Exposoma

El exposoma es un concepto formulado en 2005 por Christopher P. Wild, epidemiólogo molecular y director de la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer en Estados Unidos, que surgió como una estrategia novedosa para evidenciar el papel que tienen los factores medio ambientales en el desarrollo de diversas enfermedades (Vicente-Herrero et al., 2016). Ya que las exposiciones ambientales se presenten en forma de mezclas complejas es necesario comprender cómo éstas mezclan afectan la salud.

Por definición, el exposoma hace referencia a la totalidad de las exposiciones ambientales de un ser humano a lo largo de la vida (Gracia-Cazaña et al., 2020) desde la concepción hasta el final de la vida (Scholz et al., 2022; Tang et al., 2021) y refiere a cómo esas exposiciones impactan en la salud de las personas (Khatri & Pennington, 2022).

El concepto de exposoma abarca tres dominios principales de exposición: 1) el exposoma interno (endo-exposoma), relacionado con el metabolismo, la inflamación, el estrés oxidante, etc.; 2) el exposoma externo específico (ecto exposoma) que engloba a los agentes químicos, agentes biológicos, radiación entre otros (Vineis, 2019); y 3) el exposoma general externo, que incluye componentes psicosociales y el clima (Tang et al., 2021).

Respecto a la contaminación del aire, el exposoma consiste en la exposición a diferentes contaminantes durante una ventana de tiempo y espacio definida (X. Chen et al., 2022), lo cual se puede traducir en dos parámetros: la dosis de exposición y dosis de inhalación durante un periodo determinado.

2.2.2 Efectos de los contaminantes atmosféricos en la salud

La contaminación del aire tiene varios efectos negativos en la salud humana. Estos efectos pueden deberse a una exposición corta o prolongada. Entre los efectos derivados de una exposición de corto plazo se encuentran la enfermedad pulmonar obstructiva crónica, asma, silbancias, tos, dificultad para respirar. Mientras que los efectos a largo plazo están asociados al desarrollo de enfermedades cardiovasculares, respiratorias, incluyendo cáncer (IARC, 2013; Manisalidis et al., 2020)

Los niños representan un grupo particularmente sensible a la contaminación del aire ya que su sistema inmune se encuentra en desarrollo (Kim et al., 2013; WHO 2018). Dentro de los efectos en infantes se encuentran diferentes trastornos respiratorios, cardiovasculares, mentales y perinatales que conducen a la mortalidad o a la aparición de enfermedades crónicas en la etapa adulta. (Kelishadi & Poursafa, 2010).

2.3 Estudios previos

2.3.1 Estudios en CDMX

El Área Metropolitana de la Ciudad de México es una de las ciudades más grandes y pobladas del mundo y experimenta altos niveles de contaminación (Molina et al., 2010). La demanda energética debida al continuo aumento poblacional en esta urbe deriva en un aumento en emisiones de contaminantes. Los principales contaminantes que afectan la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) son el material particulado menor a 10 micras (PM_{10}) y menor a 2.5 micras ($PM_{2.5}$), los óxidos de nitrógeno (NO_x), los compuestos orgánicos volátiles (COV) y el ozono (O_3) (SEDEMA,2021). Los estándares para estos contaminantes con el objetivo de proteger la salud pública se encuentran en una serie de Normas Oficiales Mexicanas (NOM) y se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores guía de exposición ambiental a contaminantes (SEDEMA)

Especie	Tiempo corto	Tiempo largo	Efectos en salud
CO	26 ppm (1 hora) 9 ppm (8 horas)		Respirar aire con una alta concentración de CO reduce la cantidad de oxígeno transportado en el torrente sanguíneo a órganos críticos como el corazón y el cerebro. En niveles muy altos, el CO puede causar mareos, confusión, pérdida del conocimiento y la muerte. (EPA, 2021)
SO₂	0.040 ppm (24 horas)	0.075 ppm (3 años)	Puede afectar el sistema respiratorio, funciones de los pulmones e irritación de ojos. La inflamación de las vías respiratorias provoca tos, secreción de mucosidad, empeoramiento del asma y bronquitis crónica y hace que las personas sean más propensas a las infecciones de las vías respiratorias. Cuando el SO ₂ se combina con agua forma ácido sulfúrico que es el componente principal de la lluvia ácida. (WHO, 2021)
O₃	0.090 ppm (1 hora) 0.065 ppm (8 horas)		Puede tener un efecto marcado en la salud humana causando problemas respiratorios, asma y reducción en la función pulmonar (WHO, 2021)
NO₂	0.106 ppm (1 hora)	0.021 ppm (1 año)	Estudios epidemiológicos han demostrado que los síntomas de bronquitis en niños asmáticos aumentan en asociación con la exposición a largo plazo al NO ₂ . El crecimiento reducido de la función pulmonar también está relacionado con el NO ₂ en concentraciones actualmente medidas (u observadas) en ciudades de Europa y América del Norte. (Huangfu & Atkinson, 2020; WHO, 2021)
PM₁₀	70 µg/m ³ (24 horas)	36 µg/m ³ (1 año)	Los efectos de las PM se producen en los niveles de exposición que actualmente experimentan muchas personas en áreas urbanas y rurales. (Takebayashi et al., 2022; EPA 2021; WHO, 2021)
PM_{2.5}	41 µg/m ³ (24 horas)	10 µg/m ³ (1 año)	

Dentro de la ZMVM las fuentes móviles representan la principal fuente de emisiones de CO (95%) y de NO_x (86%). Dentro de este tipo de fuentes, se tiene que el sector transporte es la fuente de emisiones principal de PM₁₀ y PM_{2.5} (40% y 43% respectivamente).

Las fuentes puntuales son las principales emisoras de SO₂ (33%), destacando la generación de energía eléctrica dentro de este grupo de emisiones. (SEDEMA, 2021).

En la Ciudad de México han sido publicados un gran número de estudios relacionados con los efectos de la contaminación en la salud, entre ellos, daño en el ADN (Ernesto et al., 2002), enfermedades respiratorias como el asma (Rojas-Martinez et al., 2007), enfermedades cardiovasculares (Shields et al., 2013) y mortalidad en general (Bell et al., 2008), evaluando la mayoría de ellos los efectos en la salud a partir de la exposición a un contaminante aislado.

2.3.2 Estudios con co-exposición

Las personas comúnmente están expuestas a más de un contaminante tanto en ambientes intramuros como en el exterior. Los estudios para estimar los efectos de una co-exposición a dos o más contaminantes deberían ser más relevantes para determinar los riesgos en la salud humana que aquellos estudios enfocados al estudio de un contaminante a la vez (Harkema & Wagner, 2005). Estudiar los efectos en diferentes aspectos de la salud que tienen las mezclas de contaminantes se ha convertido en una tarea inevitable. (Yu Zhang et al., 2021)

Determinar los efectos que tiene un contaminante por sí solo es difícil, ya que los contaminantes atmosféricos se encuentran dentro de una mezcla compleja de co-contaminantes (Dominici et al., 2003), es por ello que la exposición total a los

contaminantes puede representar una manera adecuada para establecer parámetro comparativo entre contaminantes y salud.

Diversos autores han reportado algunos de los efectos a la salud relacionados con la exposición dentro de una mezcla de contaminantes, como trastornos en la respiración durante el sueño (Wang et al., 2022), daños en la composición de la mucosa nasal por exposición conjunta a $PM_{2.5}$ y O_3 (Yan et al., 2022), mayor riesgo de enfermedades cardiacas debido a la exposición conjunta entre SO_2 , NO_2 y $PM_{2.5}$ (Yingying Zhang et al., 2015), síntomas de depresión en mujeres de la tercera edad debido a exposición de NO_2 y $PM_{2.5}$ (Petkus et al., 2022), daño en el tejido de los pulmones por O_3 y NO_2 (Farman et al., 1999).

2.4 Contaminación y mecanismos de afección a la salud

Existen cuatro mecanismos probables por los que la contaminación del aire favorece la progresión y exacerbación de enfermedades de las vías respiratorias: incremento en el estrés y daño oxidativo, inflamación de las vías respiratorias, remodelación de las vías respiratorias y aumento de la sensibilidad a los alérgenos; siendo el estrés y el daño oxidativo los más importantes (Katsouyanni, 2003).

2.4.1 Inhalación de gases (daño inducido por la exposición a ozono)

El ozono inhalado no ingresa a las células, reacciona con los componentes del líquido que recubre las vías respiratorias generando otras especies reactivas del oxígeno aumentando el estrés oxidativo local, la inflamación y lesión epitelial (Mumby et al., 2019). El inhalar ozono provoca un decremento en la función pulmonar e incrementa la respuesta de las vías respiratorias a estímulos no específicos mediante inflamación y lesiones en el tejido epitelial (Jang An Soo Choi In Seon, 2003).

El ozono se disuelve en el líquido de revestimiento epitelial para producir especies reactivas de oxígeno provocando un aumento en las especies de oxígeno reactivo

intracelular y en la permeabilidad de las células epiteliales (Auten & Foster, 2011). Esto tiene un efecto sobre las vías intracelulares y en la superficie celular que conduce a la inducción de ARN mensajero produciendo citoquinas inflamatorias, factores de crecimiento y enzimas de remodelación (Biswas & Rahman, 2009). El estrés oxidativo en los espacios aéreos y la sangre inducen la liberación secundaria de mediadores inflamatorios que desencadenan la proliferación y activación de vías de señalización inflamatorias que conducen a enfermedades graves como el asma y la Enfermedad pulmonar obstructiva crónica (Rahman & MacNee, 2000).

2.4.2 Inhalación de partículas

Al inhalar aire, las partículas más grandes y gruesas ($>10 \mu\text{m}$ de diámetro aerodinámico) se filtran y depositan en la nariz y la nasofaringe, mientras que las partículas de menor tamaño ($< 2.5 \mu\text{m}$ de diámetro aerodinámico) descienden hacia el tracto respiratorio inferior a través del árbol traqueobronquial donde algunas son retenidas (Mack et al., 2019). Las partículas más pequeñas ($< 0.1 \mu\text{m}$ de diámetro aerodinámico) se depositan en el revestimiento de la mucosa alcanzando los alvéolos a través de los cuales sustancias tóxicas que forman parte de la composición química de las partículas, se infiltran en el sistema circulatorio (Wu et al., 2018), las cuales pueden inducir una respuesta inflamatoria provocando enfermedades en las vías respiratorias (Khatri & Pennington, n.d.).

Diversos estudios in vitro con líneas celulares derivadas de epitelio pulmonar han demostrado que las partículas estimulan la respuesta inmunitaria innata. Las células mediadoras de respuesta son las dendríticas residentes en las vías respiratorias. Las células fagocíticas, macrófagos y polimorfonucleares secuestran partículas y patógenos para posteriormente migrar a los ganglios linfáticos mediastínicos estimulando células específicas de antígenos para que secreten citocinas proinflamatorias que conducen a una inflamación pulmonar (Matthews et al., 2015).

Estudios en pacientes con bronquiectasia - dilatación permanente de los bronquios- la exposición incluso a niveles más bajos de partículas, disminuye su capacidad de eliminación de patógenos (Aravamudan et al., 2013; Soleti et al., 2013). Lo que hace a este tipo de personas más sensibles a estos contaminantes.

Capítulo 3. Objetivos e hipótesis

3.1 Objetivos

- Ordenar los datos de las concentraciones ambientales de contaminantes atmosféricos de la Ciudad de México en el corto y mediano plazo.
- Determinar la carga de exposición de contaminantes atmosféricos en la Ciudad de México.^o
- Asociar la carga de exposición a la población residente no móvil en zonas cercanas a diversas estaciones de monitoreo.

3.2 Hipótesis

- La exposición total atmosférica en términos de masa de contaminantes tiene un efecto adverso en la salud de los diferentes sectores de la población de la Ciudad de México.
- La cantidad total de contaminantes ambientales a los que se expone la población en la CDMX es diferente, dada la dinámica de emisiones y transporte de contaminantes de la ciudad.

Capítulo 4. Métodos y análisis

4.1 Datos empleados

Para el presente estudio se emplearon los datos correspondientes a la concentración ambiental promedio horaria para las especies monitoreadas y presión atmosférica de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) de la Secretaría del Medio Ambiente de la CDMX, así mismo, se utilizaron los datos de temperatura ambiente de la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET) para los años 2019, 2020 y 2021. Todos los datos se encuentran disponibles en el sitio: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php>

La elección de los años se debió a la dinámica poblacional característica de cada uno de ellos como se observa en la Figura 1. Primeramente, el año 2019, último año con una rutina normal antes de la pandemia ocasionada por el virus SARS-Cov-2. Posteriormente el año 2020, marcado por el confinamiento a causa de la COVID-19, vigente desde el 23 de marzo hasta el 31 de mayo y el período conocido como Nueva Normalidad que se caracterizó por un retorno paulatino a las actividades en función del número de casos positivos de COVID-19. Ese año se caracterizó por la disminución en el tránsito de vehículos y reducción de las actividades industriales. Por último, el 2021, año en el que se retornó a la mayoría de las actividades de la población provocando un aumento en el tránsito vehicular y actividades industriales respecto al año anterior.

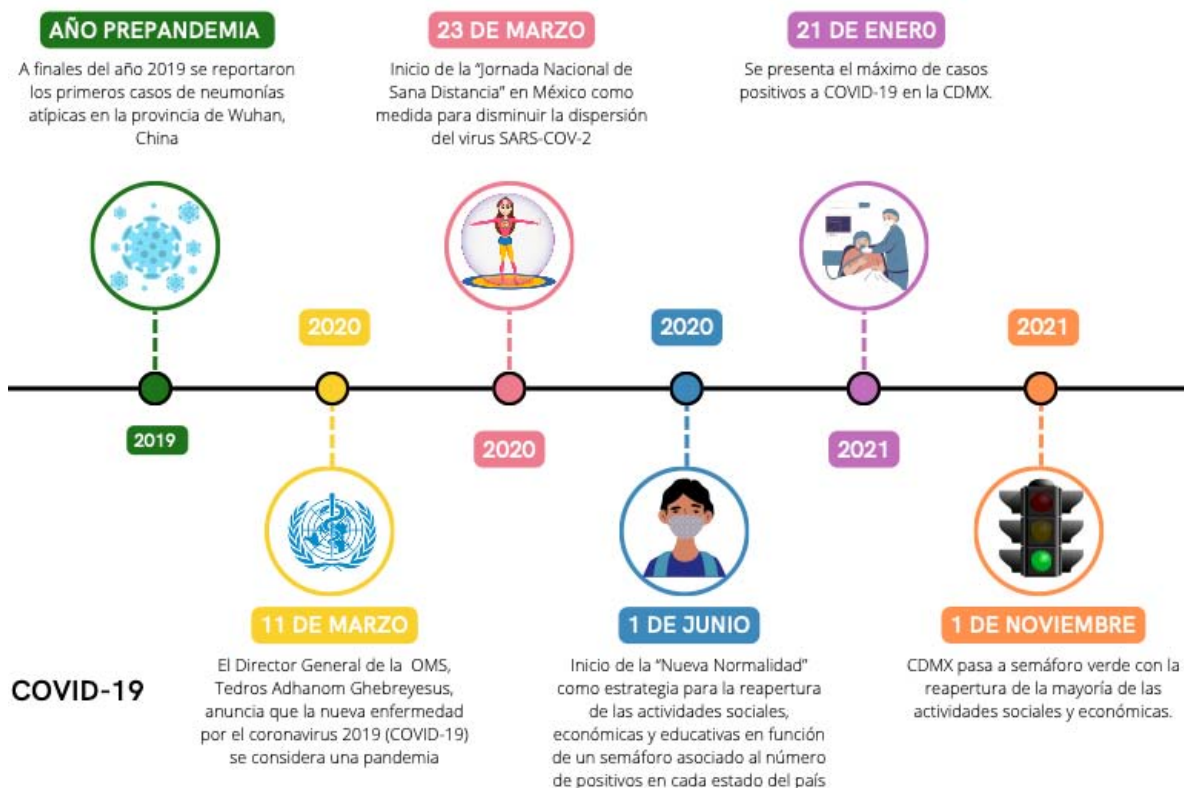


Figura 1. Desarrollo de la COVID-19 en la Ciudad de México.

4.1.1 Selección de datos

Del total de estaciones disponibles con mediciones de la RAMA, se eligieron aquellas que contaran con más de 75% de datos validados a lo largo de cada uno de los años estudiados para los siguientes contaminantes: monóxido de carbono (CO), óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃), dióxido de azufre (SO₂) y material particulado menor a 2 micras (PM_{2.5}).

A partir de esta condición se escogieron las estaciones Centro de Ciencias de la atmósfera (CCA), Merced (MER), Nezahualcóyotl (NEZ), Santa Fe (SFE), Tlalnepantla (TLA) y UAM Xochimilco (UAX) y la estación FES Acatlán (FAC) para el análisis de contaminantes en fase gaseosa (CO, NO, NO, O₃, SO₂) y para el análisis del material particulado (PM_{2.5}) se emplearon las mismas estaciones a

excepción de la estación FES Acatlán (FAC) al no contar con mediciones para este contaminante.

4.1.2 Limpieza y depuración de series de datos

Se eliminaron todos los datos nulos, reportados como -99, dentro de las series de tiempo obtenidas de la RAMA, así mismo se eliminaron los valores con concentraciones iguales a cero (0) ya que se considera que en la atmósfera difícilmente existen concentraciones de cero al existir una concentración residual.

4.1.3 Conversión de unidades de concentración

Las concentraciones para NO, NO₂, O₃, SO₂ y CO reportadas en unidades volumétricas (ppm o ppb) fueron convertidas a unidades de masa por volumen ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) a condiciones de presión y temperatura para cada estación empleada. Para ello fue necesario descargar los datos de temperatura de la Red de Meteorología (REDMET) y de presión para los años de estudio. Los datos se encuentran disponibles en el sitio web (<http://www.aire.cdmx.gob.mx/>). Las conversiones se realizaron mediante la siguiente ecuación:

$$C\left(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}\right) = \frac{C(\text{ppm})PM}{RT}$$

Ec 1. Conversión a unidades de masa/volumen

Donde:

- $C(\mu\text{g}/\text{m}^3)$ = Concentración en unidades de masas [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
- $C(\text{ppm})$ = Concentración en partes por millón obtenidas de la RAMA [ppm]
- P = Presión en la estación de monitoreo [mm Hg]
- M = Masa molar del contaminante
- T = temperatura [K]
- R = constante de los gases ideales [62.36367 mmHg·L/mol·K]

Para los datos faltantes de presión y temperatura se emplearon los valores de 585 mm Hg y 289.15 K respectivamente al ser los promedios para ambas propiedades dentro de la CDMX.

4.2 Características de las estaciones consultadas

La Figura 2 muestra las estaciones empleadas en el presente estudio y la zona donde se localizan en función de lo dispuesto en la RAMA. De acuerdo con las características de las estaciones y su ubicación, éstas se clasificaron en industrial, de tráfico, residencial o de fondo conforme lo dispuesto en el Reino Unido conforme a Vincent & Stedman (2013).

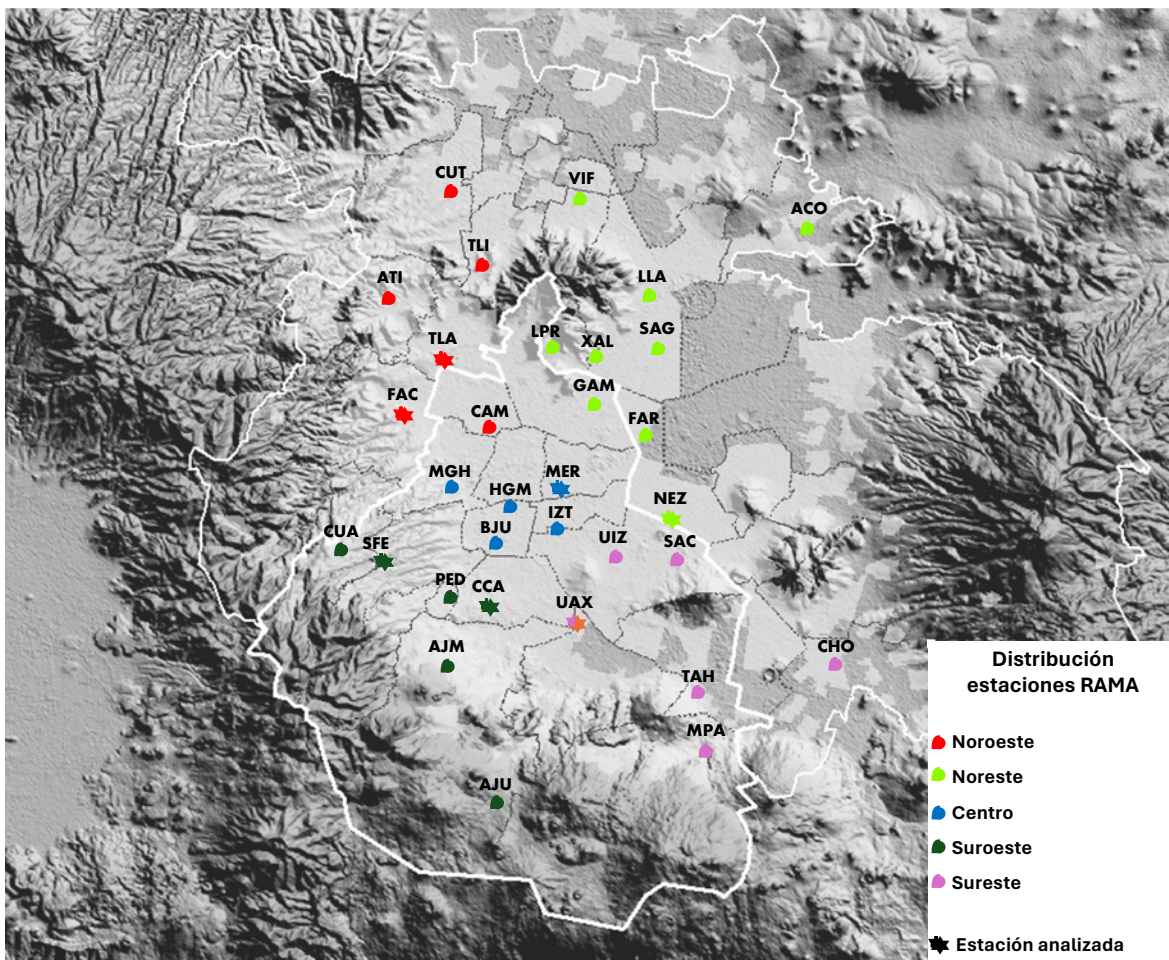


Figura 2. Distribución de las estaciones de la RAMA

4.2.1 Estación Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA)

Ubicada en Investigación Científica s/n, C.U., Coyoacán, 04510 Ciudad de México, CDMX dentro de las instalaciones de la Universidad Nacional Autónoma de México, en la azotea del edificio principal del Instituto de Ciencias de la Atmósfera, se encuentra inmersa dentro de una zona residencial sin avenidas principales cercanas a la estación motivo por la cual fue considerada como una estación de fondo. Se encuentra dentro de la zona suroeste conforme a la división empleada en SEDEMA, (2021). La figura 3 muestra el entorno de la estación en la que se aprecia que dentro de un radio de incidencia de 1 km se localiza una porción importante de la Universidad Nacional Autónoma de México y en la parte oriente se localiza una zona habitacional.



Figura 3. Entorno estación CCA.

4.2.2 Estación Facultad de Estudios Superiores Acatlán (FAC)

Ubicada en Av. Alcanfores y San Juan Totoltepec s/n, Col. Santa Cruz Acatlán, C.P. 53150 dentro de las instalaciones de la FES Acatlán, UNAM, en la azotea del edificio

de Clínica Odontológica. Cerca de la estación se encuentra una avenida con tráfico moderado y un pequeño estacionamiento por lo que se clasificó como una estación de tráfico/ fondo. De acuerdo con SEDEMA, (2021) se encuentra en la zona noroeste dentro de la Red de Monitoreo.

En la figura 4 se aprecia que la estación está rodeada por las instalaciones de la Facultad de Estudios Superiores Acatlán, una zona importante de áreas verdes sumado a una zona con un uso residencial.



Figura 4. Entorno estación FAC.

4.2.3 Estación Merced (MER)

Ubicada en Congreso de la Unión esq. Stan de Tiro s/n, Col. Merced Balbuena, C.P. 15860, en las cercanías del Centro Histórico de la Ciudad de México. La estación se ubica en la azotea de un edificio de un piso junto a una escuela secundaria. Las calles que rodean a la estación son altamente transitadas. Al oeste se encuentra un camino elevado del Sistema de Transporte Colectivo Metro, razones por las cuales esta estación se clasificó como de tráfico. De acuerdo con SEDEMA, (2021) se encuentra en la zona centro dentro de la Red de Monitoreo.

El entorno de la estación es prácticamente residencial con un bajo número de áreas verdes como se aprecia en la figura 5.



Figura 5. Entorno estación MER.

4.2.4 Estación Nezahualcóyotl (NEZ)

Ubicada en Av. Ángel de la Independencia s/n, Col. Metropolitana 2a sección, C.P. 57740, la estación se sitúa en el techo de un edificio Público de Salud. El área circundante a la estación es residencial con ligera actividad comercial por lo que se consideró una estación residencial. De acuerdo con SEDEMA, (2021) se encuentra en la zona noreste dentro de la Red de Monitoreo.

La figura 6 muestra que el entorno de la estación es totalmente residencial, lo que sugiere una alta densidad poblacional alrededor de esta estación.



Figura 6. Entorno estación NEZ

4.2.5 Estación Santa Fe (SFE)

Ubicada en Av. Carlos Lazo s/n, entre Tamaulipas y Sta. Fe, Col. Prados de la Montaña, C.P. 05619, se sitúa dentro del “Parque Prados de la Montaña” por lo que se consideró como una estación de fondo. De acuerdo con SEDEMA, (2021) se encuentra en la zona suroeste dentro de la Red de Monitoreo.

En las inmediaciones de la estación se encuentra un gran número de áreas verdes además de algunas zonas residenciales como lo muestra la figura 7.



Figura 7. Entorno estación SFE.

4.2.6 Estación Tlalnepantla (TLA)

Ubicada en Glorieta Atlacomulco s/n, Col. Tlalnemex, C.P. 54070, la estación se sitúa sobre lo alto de una plataforma de 2 metros dentro de las instalaciones de agua dentro del municipio. No se encuentran calles principales adyacentes al sitio y la zona es residencial en su mayoría por lo que dentro del presente trabajo se consideró como una estación industrial/residencial. De acuerdo con SEDEMA, (2021) se encuentra en la zona noroeste dentro de la Red de Monitoreo.

Conforme a la figura 8, en las cercanías de la estación se observan un número importante de naves industriales, además de una zona residencial.



Figura 8. Entorno estación TLA.

4.2.7 Estación Universidad Autónoma de México, Xochimilco (UAX)

Ubicada en Calz. del Hueso 1100, Col. Villa Quietud, C.P. 04960 dentro de las instalaciones de la UAM campus Xochimilco en la azotea de un edificio de cuatro pisos. Las instalaciones de la universidad se encuentran dentro de una zona residencial sin avenidas principales adyacentes a la estación por lo que se clasificó como una estación residencial. De acuerdo con SEDEMA, (2021) se encuentra en la zona sureste dentro de la Red de Monitoreo.

De acuerdo con la figura 9, la mayor parte del entorno de la estación corresponde a zona habitacional, sin embargo, en la zona este se encuentra un área verde importante de dimensiones considerables.



Figura 9. Entorno estación UAX

Las estaciones de monitoreo elegidas cumplen con la NOM-156-SEMARNAT-2012 que establece las características y condiciones para garantizar una correcta medición de los datos. Adicionalmente, se cumple con el 75 % de los datos validados necesarios para hacer análisis estadísticos como lo dispone la Norma antes citada.

4.3 Cálculo del área bajo la curva

Con las concentraciones horarias en unidades de masa ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), se calculó el área bajo la curva mediante el método de la regla del trapecio o trapezoidal. Las áreas se calcularon mediante la siguiente expresión:

$$\text{Área} = \sum \left[\frac{(C_1 + C_2)}{2} \times (t_2 - t_1) \right]$$

Ec 2. Cálculo del área bajo la curva mediante método del trapecio.

4.4 Cálculo de exposición diaria y anual

Con la finalidad de conocer la exposición total en la CDMX en el corto y largo plazo, se hizo el perfil de exposición diaria y exposición anual.

4.4.1 Exposición diaria (corto plazo)

Con ayuda del software R-Studio y la paquetería Openair se extrajo el promedio para cada hora del día de las áreas bajo la curva (concentraciones) para conformar un perfil de exposición promedio diaria (24 horas) para cada uno de los contaminantes analizados. La exposición promedio diaria para contaminantes gaseosos corresponde a la suma algebraica de los promedios para cada una de las 24 horas del día para CO, NOx, NO₂, O₃ y SO₂, mientras que la exposición promedio diaria para el material particulado corresponderá a la suma algebraica del promedio obtenido para cada hora para PM_{2.5}. La ecuación 2 representa el cálculo para la exposición diaria

$$\text{Exposición diaria} = \sum_{i=1}^{24} (\text{Concentración promedio}_i \times 1_h)$$

Ec 3. Cálculo de exposición ambiental diaria

Con esta información, se construyeron perfiles diurnos para cada una de las estaciones, los cuales se pueden consultar en el anexo de este documento. Los resultados de la exposición promedio diaria en cada una de las estaciones se muestran en un mapa para comparar la exposición diaria en diferentes zonas de la CDMX.

El procedimiento se repitió para cada año estudiado y después se compararon los años para ver los cambios a lo largo de este periodo.

4.4.2 Exposición anual (largo plazo)

Para la obtención del área bajo la curva, se tomó como referencia el promedio horario para cada semana del año y el resultado se extrapolo al número de horas por semana y realizar el perfil anual. La exposición anual corresponde a la suma de las áreas semanales para CO, NO, NO₂, O₃ y SO₂ en el caso de los gases y del PM_{2.5} para el material particulado. La ecuación 4 muestra el cálculo de la exposición anual.

$$\text{Exposición anual} = \sum_{i=1}^{52} (\text{Concentración promedio semanal}_i \times 168_h)$$

Ec 4. Cálculo de exposición ambiental anual

Con esta información se construyeron perfiles anuales para analizar el comportamiento de la exposición durante el periodo de estudio en el territorio de la CDMX mediante cada una de las estaciones elegidas. Los resultados se desplegaron en un mapa para comparar la exposición en diferentes regiones de la ciudad.

Se compararon los resultados obtenidos para los tres años de estudio con la finalidad de establecer si los cambios en la dinámica poblacional de la ciudad repercutieron en la exposición. Para una mejor representación de los datos, los datos de exposición anual se convirtieron de µg a g mediante una regla de tres para expresar la exposición ambiental anual en unidades de $g \cdot \text{año} / m^3$.

*Los datos de las semanas sin datos se completaron empleando el promedio diario extrapolado a una semana.

4.5 Análisis de varianza

Para valorar la existencia de diferencias estadísticamente significativas en las concentraciones registradas para cada uno de los años y estaciones analizadas durante el periodo de estudio, se realizó un análisis de varianza no paramétrica mediante la Prueba de Kruskal-Wallis y pruebas post hoc de Dunn empleando los datos de la exposición anual obtenidos.

Primeramente, se buscaron diferencias significativas entre las concentraciones registradas entre los años de estudio para evaluar de manera general los efectos que tuvo cada una de las etapas analizadas: prepandemia, confinamiento y “Nueva Normalidad”.

También se realizó el análisis buscando las diferencias entre las estaciones evaluadas para identificar la existencia de diferencias estadísticamente significativas en las concentraciones registradas durante el periodo 2019-2021 en los diferentes puntos de la Ciudad de México.

Por último, para observar el comportamiento en las concentraciones de contaminantes a lo largo del periodo de estudio, se realizó el análisis para tres escenarios en cada una de las estaciones:

- Los años 2019 y 2020 que se caracterizan por la transición de la Normalidad a las condiciones de confinamiento ocasionado por la llegada de la COVID-19 a México y la “Nueva Normalidad”.
- Los años 2020 y 2021 donde se da la transición del confinamiento a la “Nueva Normalidad” con un relajamiento de las medidas de aislamiento y la apertura a diversas actividades sociales.
- Los años 2019 y 2021 para comparar las concentraciones entre condiciones pre-pandemia y las de la “Nueva Normalidad”.

El análisis se realizó para los dos tipos de contaminantes analizados: gases y PM_{2.5} empleando el software R-Studio.

4.6 Cálculo de la dosis de inhalación

Para el cálculo de la dosis de inhalación se requieren conocer la concentración de exposición ambiental, el tiempo de exposición y la tasa de inhalación del o los sujetos en estudio. Para ello, se dividió la población en 5 grupos en función de la edad y el género empleando el promedio ponderado en el tiempo de las tasas de inhalación (IR, por sus siglas en inglés) a partir de las actividades diarias, de acuerdo con el Manual de Exposición de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, 2011). Dicha clasificación toma en cuenta la actividad promedio que realiza una persona dentro de cada grupo. Los grupos empleados y las IR se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Grupos poblacionales y tasas de inhalación de acuerdo con actividad diaria

Grupos	IR (descanso) (m ³ /h)	Horas	IR (actividad ligera) (m ³ /h)	Horas	IR (m ³ / día)
Niño 0 a 2 años	0.09	14	0.25	10	3.76
Niño 2-11 años	0.29	8	0.78	16	14.8
Mujer adulta	0.36	8	1.14	16	21.12
Hombre adulto	0.45	8	1.12	16	21.52

Con la información de la IR de cada uno de los grupos, se calculó la dosis de inhalación mediante la siguiente expresión para la dosis de inhalación diaria:

$$Dosis\ inhalada\ diaria = \sum_{i=1}^{24} (Concentración\ promedio_i \times 1\ h \times IR)$$

Ec 5. Cálculo de dosis de inhalación diaria

$$Dosis\ inhalada\ anual = \sum_{i=1}^{52} (Concentración\ semanal_i \times 168\ h \times IR)$$

Ec 6. Cálculo de dosis de inhalación anual

4.7 Cálculo de población expuesta

La tabla 3 muestra la representatividad que tiene cada uno de los contaminantes en las estaciones analizadas. Con base en esta característica se determinó un radio de influencia para cada estación de 1 km.

La estimación de la población se determinó a partir de las AGEB's urbanas que caen dentro del radio de influencia de cada estación. Se tomó la parte proporcional de cada AGEB asumiendo una distribución homogénea a lo largo de todo el polígono. La lista de las AGEB's comprendidas dentro de cada estación se encuentran dentro del Anexo A del presente documento.

Tabla 3. Representatividad de contaminantes analizados

Estación	Zona	O ₃	CO	SO ₂	NO ₂	PM ₁₀	PM _{2.5}
Nezahualcóyotl	Noreste	3	2	3	3	/	3
Tlalnepantla	Noroeste	3	1	3	3	3	3
CCA	Suroeste	3	2	4	3	/	3
UAM Xochimilco	Sureste	3	2	3	3	/	3
Merced	Centro	3	2	3	3	3	3
FES Acatlán	Noroeste	3	2	3	3	3	
Santa Fe	Suroeste	4	3	4	3	3	4
1.- Micro (hasta 100m) • 2.- Media (>100 m a 1km) • 3.- Vecinal (1 a 4km) • 4.- Urbana (de 4 a 20km) • 5.- Regional (>20km)							

Capítulo 5. Resultados

5.1 Dosis de exposición ambiental diaria

5.1.1 Perfiles diarios año 2019 (exposición 24 h)

La figura 10 muestra el perfil de exposición ambiental diaria a gases para la estación Tlalnepantla, el cual se utiliza como ejemplo para describir la dinámica de la exposición a lo largo del día al presentarse un perfil similar en todas las estaciones variando únicamente la magnitud de la exposición. La estación TLA presentó la mayor exposición. En el perfil se observa que el contaminante gaseoso en términos de masa que se encuentra en mayor proporción es el CO y por tanto domina la dinámica de la exposición a lo largo del día. El pico máximo de exposición se alcanza aproximadamente a las 9 de la mañana, seguido de un segundo pico alrededor de las 19 horas. El O₃ representa una contribución importante entre las 14 y 16 horas. El resto de los contaminantes (NO, NO₂ y SO₂) presenta un patrón similar al CO con un máximo alrededor de las 8 am. Dichos perfiles representan el área bajo la curva para cada contaminante.

El perfil diurno para el resto de las estaciones se puede consultar en el anexo A de este documento.

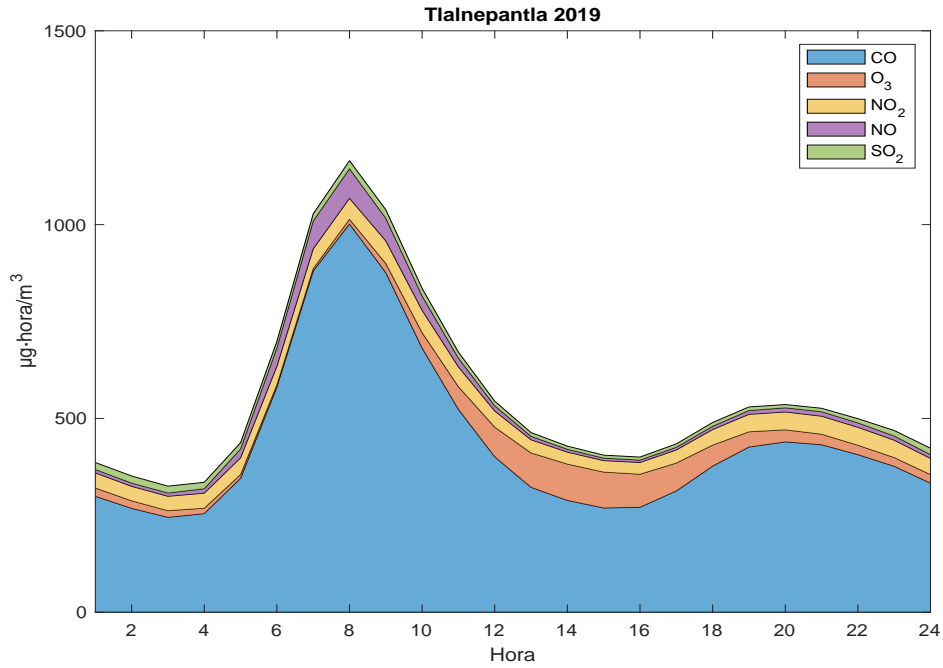


Figura 10. Perfil de exposición ambiental diaria para gases en la estación Tlalnepantla, 2019.

Respecto a las $\text{PM}_{2.5}$, la figura 11 muestra el perfil de exposición ambiental diaria de la estación Nezahualcóyotl al ser la que presentó la mayor exposición para el año 2019.

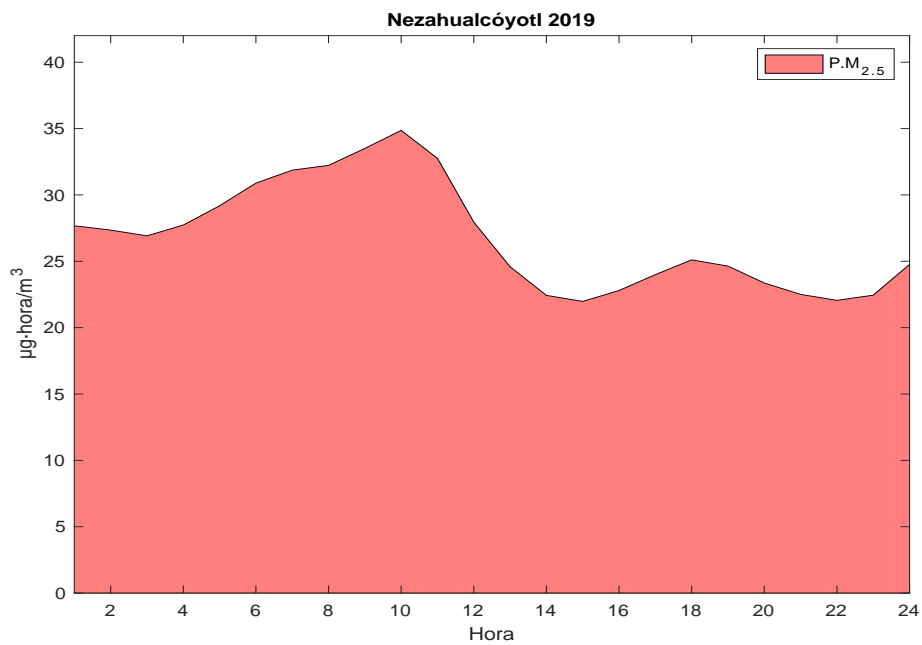


Figura 11. Perfil de exposición ambiental diaria para $\text{PM}_{2.5}$ Nezahualcóyotl, 2019.

La figura 11 muestra que el máximo de exposición para el material particulado menor a 2.5 micrómetros se presenta aproximadamente a las 10 horas, lo cual concuerda con la mayoría de las estaciones. A las 18 horas se presenta un segundo pico seguido de otro a las 24 horas. Los dos últimos picos no se presentaron en el resto de las estaciones analizadas.

Los perfiles correspondientes a las demás estaciones se encuentran en el anexo A presente en este documento.

Tabla 4. Exposición ambiental diaria para el año 2019 en las estaciones analizadas

Estación	Exposición gases [$\mu\text{g}\cdot\text{día}/\text{m}^3$]	Exposición $\text{PM}_{2.5}$ [$\mu\text{g}\cdot\text{día}/\text{m}^3$]
TLA	13420.94	592.3
MER	13339.72	577.45
FAC	13052.37	--
NEZ	12587.08	643.58
UAX	10763.22	527.35
CCA	9783.37	504.14
SFE	7956.99	469.46

La tabla 4 muestra la exposición ambiental promedio diaria para cada una de las estaciones analizadas. En ella se observa que, para los gases, la estación TLA presenta la mayor exposición con un valor de $13420.94 \mu\text{g}\cdot\text{día}/\text{m}^3$ y la estación SFE presenta la menor exposición diaria promedio con $7956.99 \mu\text{g}\cdot\text{día}/\text{m}^3$. Estas diferencias se aprecian de mejor manera en la figura 9.

La figura 12 muestra la magnitud de la exposición en cada una de las estaciones empleadas; la magnitud de la exposición en TLA es mayor al resto de las estaciones y de manera general podemos decir que para el año 2019 las exposiciones diarias fueron mayores en las zonas norte y centro de la CDMX respecto al sur. Aparentemente existe una disminución en la exposición en dirección oriente-poniente.

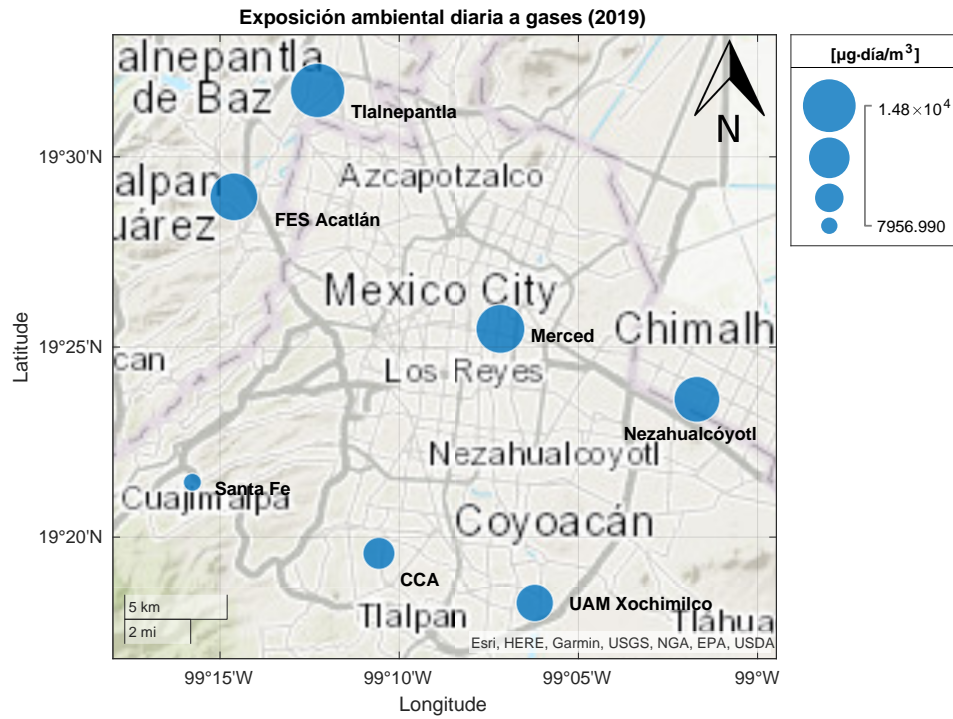


Figura 12. Ubicación de las estaciones de monitoreo empleadas y magnitud de la exposición ambiental diaria para gases, 2019.

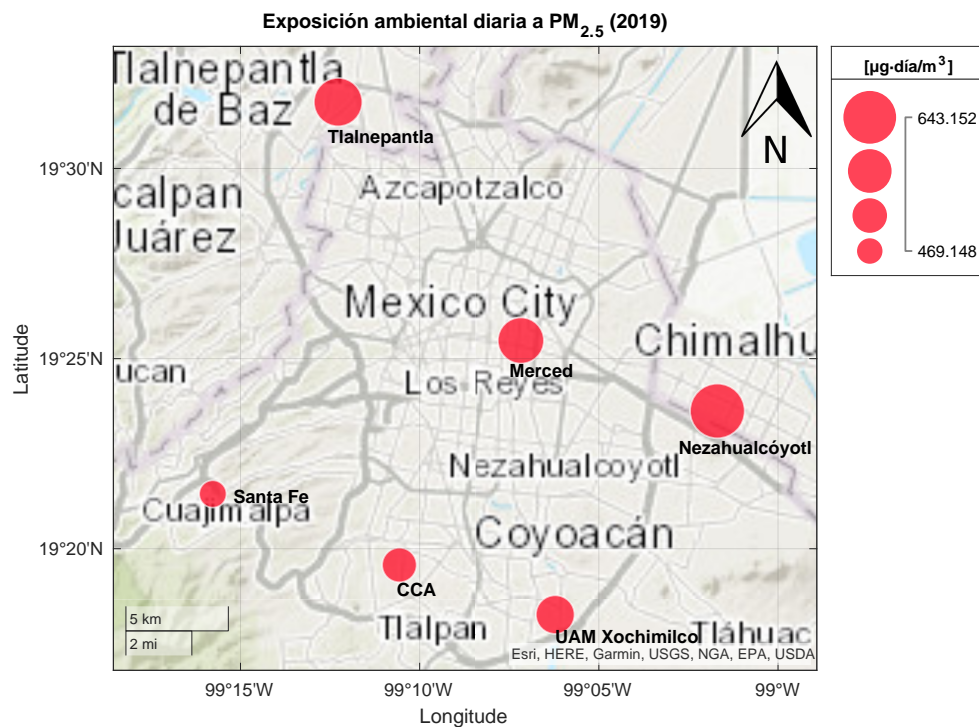


Figura 13. Ubicación de las estaciones de monitoreo empleadas y magnitud de la exposición ambiental diaria para $\text{PM}_{2.5}$.

De acuerdo con la tabla 4, para las $PM_{2.5}$, la estación NEZ presentó la mayor exposición a este contaminante y SFE la menor. Con base en la figura 13 se observa que en las zonas oriente y centro se registraron las mayores exposiciones a este contaminante. Al igual que en los gases la zona sur presenta las magnitudes más bajas.

5.1.2 Perfiles diarios año 2020 (exposición 24 h)

La figura 14 muestra el perfil de exposición ambiental promedio diaria a gases para la estación MER, al ser la que presentó la mayor exposición a lo largo del año 2020. En ella se observa el mismo comportamiento descrito anteriormente para el perfil diurno de la estación TLA para el año 2019, con un máximo de exposición alrededor de las 8 horas.

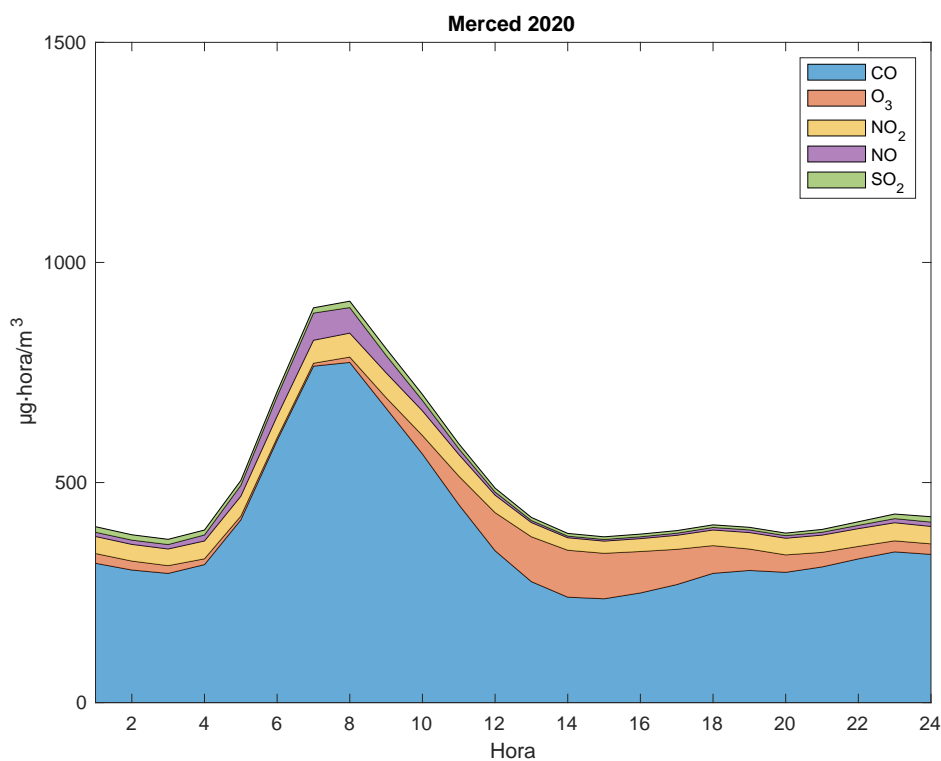


Figura 14. Perfil de exposición ambiental diario para gases en la estación Merced, 2020.

Respecto a las $PM_{2.5}$, para el año 2020 nuevamente la estación NEZ fue la que presentó la mayor exposición presentando un perfil similar al año 2019 tal y como lo muestra la figura 15.

Los perfiles para el resto de las estaciones se encuentran en el anexo A del documento.

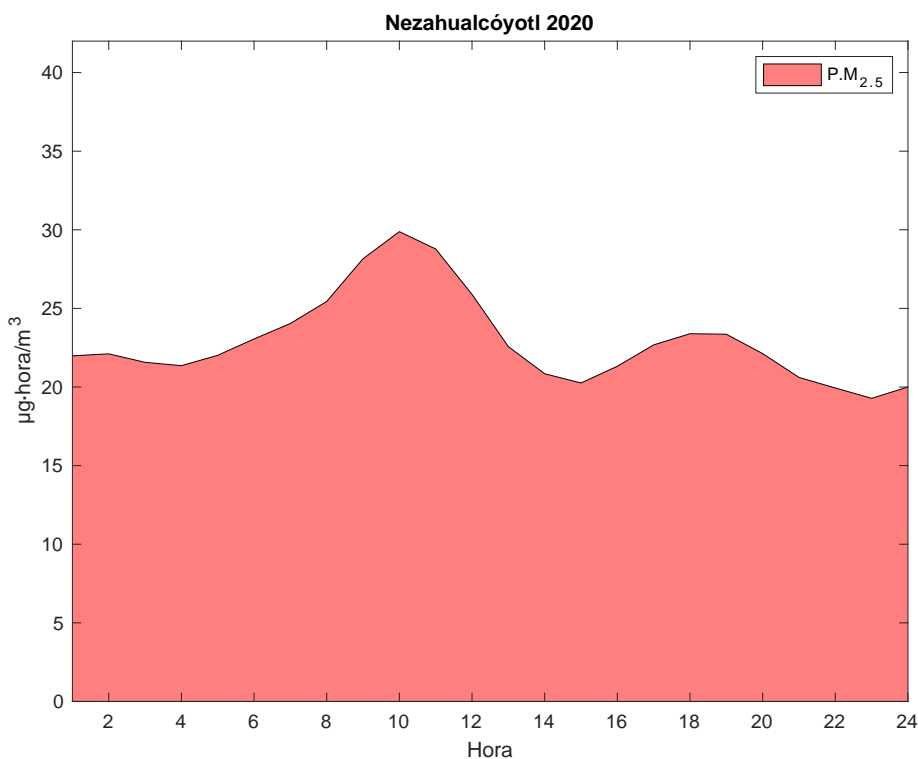


Figura 15. Perfil de exposición ambiental diario para $PM_{2.5}$ en la estación Nezahualcóyotl, 2020.

Tabla 5. Exposición ambiental diaria para el año 2020 en las estaciones analizadas

Estación	Exposición gases [$\mu\text{g}\cdot\text{día}/\text{m}^3$]	Exposición $PM_{2.5}$ [$\mu\text{g}\cdot\text{día}/\text{m}^3$]
MER	11942.14	541.24
TLA	10877.88	517.62
NEZ	10833.93	550.65
FAC	10370.67	--
UAX	9114.33	442
CCA	8752.28	422.11
SFE	7656.27	380.69

La tabla 5 muestra la exposición ambiental promedio diaria para las estaciones analizadas a lo largo del año 2020, en ella se aprecia que la estación MER y NEZ presentaron las exposiciones más altas para gases y partículas respectivamente mientras que la estación SFE presentó los valores más bajos para ambos casos.

La distribución y la magnitud de las exposiciones en cada estación se aprecian de manera clara en la figura 16 en la que se observa que en el centro de la CDMX se tiene la exposición más alta a gases, seguida del norte. Al igual que el año 2019 las exposiciones son sensiblemente menores en el sur y de igual manera se presenta un gradiente de disminución en dirección oriente-poniente para los gases.

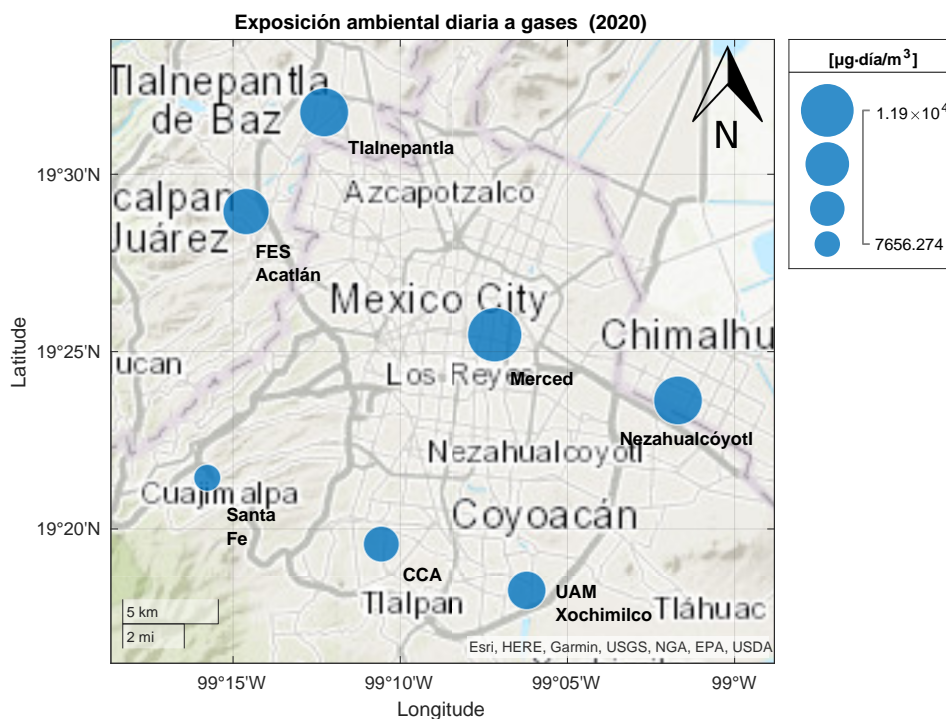


Figura 16. Ubicación de las estaciones de monitoreo empleadas y magnitud de la exposición ambiental diaria para gases, 2020.

La figura 17 muestra un patrón similar de exposición para las $\text{PM}_{2.5}$, donde las exposiciones más bajas se presentan al sur de la ciudad respecto al centro y norte.

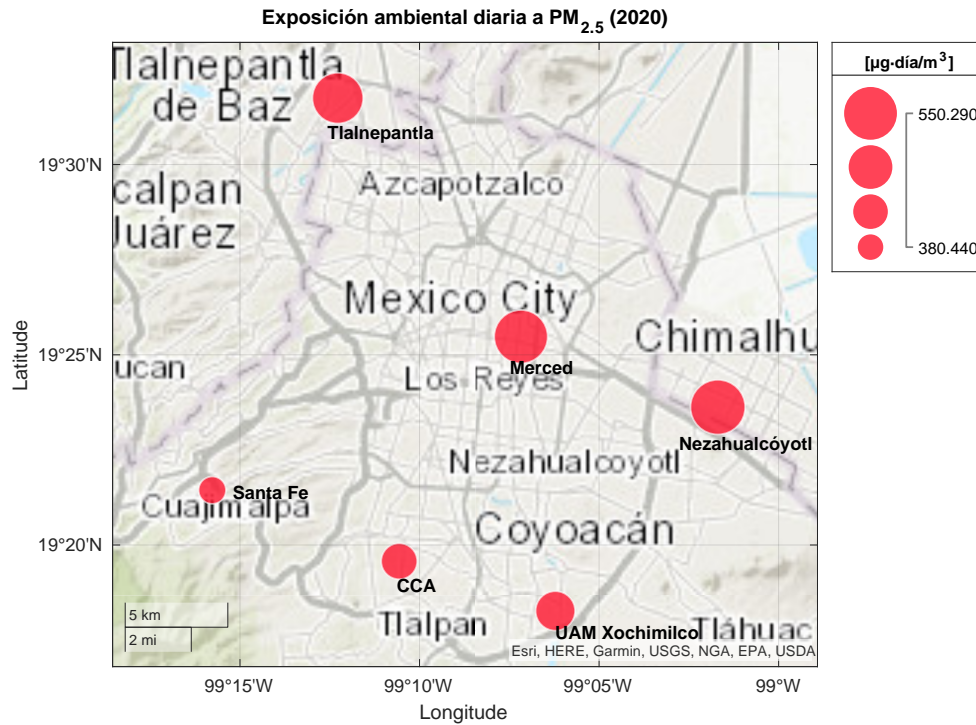


Figura 17. Ubicación de las estaciones de monitoreo empleadas y magnitud de la exposición ambiental diaria para PM_{2.5}, 2020.

5.1.3 Perfiles diarios año 2021 (exposición 24 h)

Para el año 2021, la exposición ambiental promedio diaria a gases fue mayor en la estación MER. En la figura 18 se muestra el perfil diurno para gases en la estación MER, el cual sigue el mismo patrón respecto a los años 2019 y 2020 con la mayor intensidad en la exposición alrededor de las 8 horas.

Respecto al PM_{2.5}, la figura 19 muestra que la estación NEZ nuevamente presentó las exposiciones diarias más altas presentando un pico de exposición máxima a las 10 horas y posteriormente se presenta una concentración relativamente constante a lo largo del día.

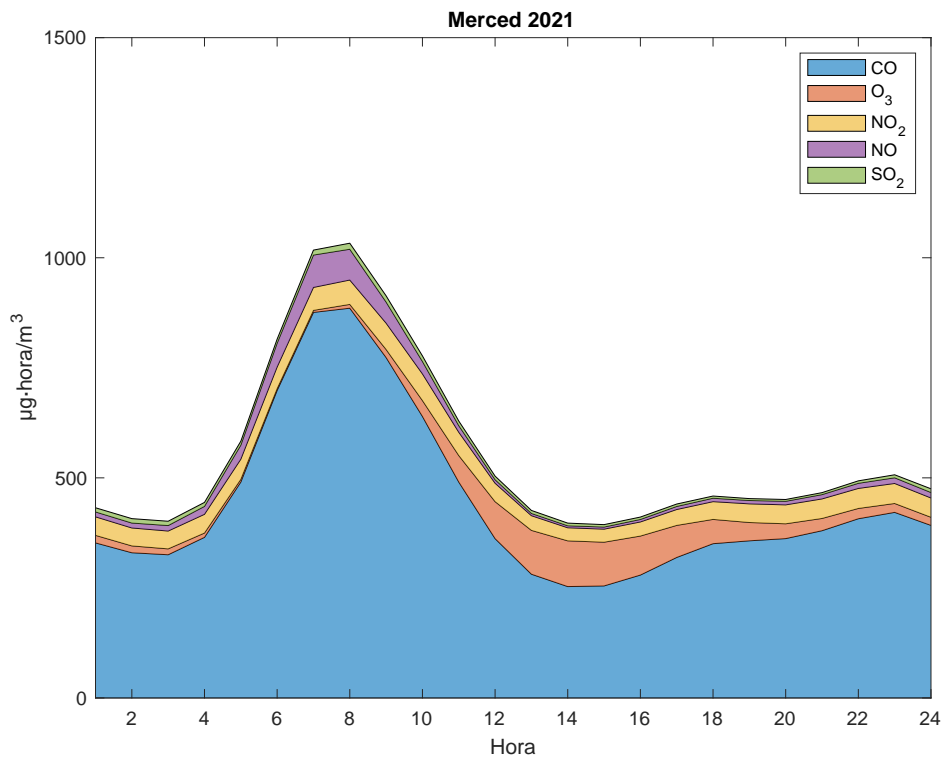


Figura 18. Perfil diario para gases en la estación Merced, 2021.

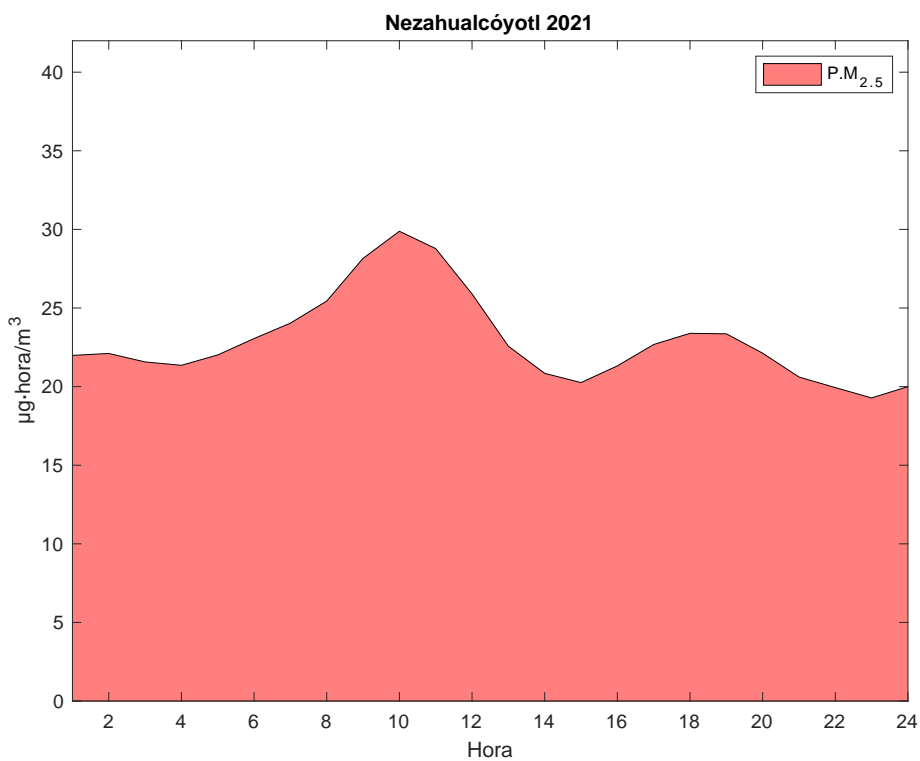


Figura 19. Perfil diario para PM_{2.5} en la estación Nezahualcóyotl, 2021.

La tabla 6 muestra la exposición ambiental promedio diaria durante el año 2021 para cada una de las estaciones empleadas. Se observa que al igual que en 2020, la estación MER y SFE presentan los valores más altos y bajos para gases respectivamente. Para el PM_{2.5}, la tendencia de los años anteriores es la misma con la mayor exposición en la estación NEZ y la menor en SFE.

Tabla 6. Exposición ambiental diaria para el año 2021 en las estaciones analizadas

Estación	Exposición gases [$\mu\text{g}\cdot\text{día}/\text{m}^3$]	Exposición PM _{2.5} [$\mu\text{g}\cdot\text{día}/\text{m}^3$]
MER	13329.81	543.79
NEZ	12879.98	562
TLA	12102.81	510.08
FAC	11482.02	--
UAX	9696.09	473
CCA	8891.17	424.31
SFE	8180.58	346.24

Respecto a la distribución de la exposición, se observa, en la figura 20, que nuevamente la zona sur presenta los valores más bajos respecto a la zona centro y norte para los gases.

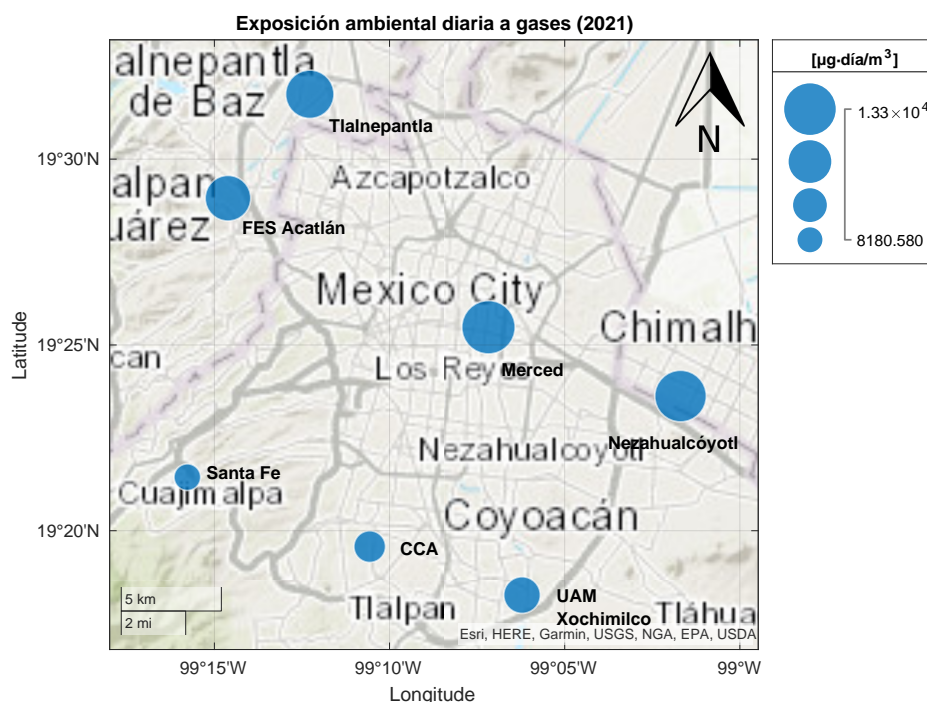


Figura 20. Ubicación de las estaciones de monitoreo empleadas y magnitud de la exposición ambiental diaria para gases, 2021.

Al igual que los gases, la exposición a material particulado es menor en la zona sur tal y como se aprecia en la figura 21. En el oriente de la ciudad se presenta la exposición más alta seguida del centro y norte.

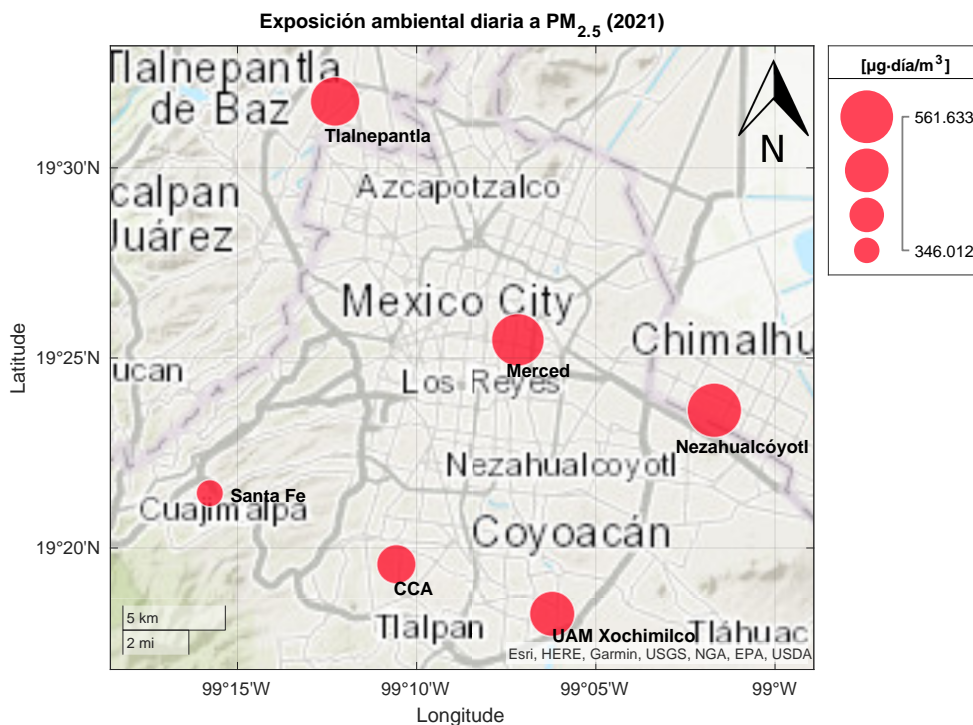


Figura 21. Ubicación de las estaciones de monitoreo empleadas y magnitud de la exposición ambiental diaria para PM_{2.5}, 2021.

5.2 Exposición ambiental anual

La exposición ambiental anual considera la suma de las concentraciones a lo largo del año en las estaciones analizadas. La tabla 7 muestra la exposición ambiental anual en el periodo estudiado; con una magnitud de la exposición en gramos - año por metro cúbico. De manera general, los resultados muestran con claridad que la estación SFE presentó los valores menores para dicha exposición para ambos contaminantes durante todo el periodo de estudio, mientras que los valores más altos se registraron en la estación MER.

Tabla 7 . Exposición ambiental anual 2019-2021

Estación	Exposición 2019 [g·año/m ³]		Exposición 2020 [g·año/m ³]		Exposición 2021 [g·año/m ³]	
	gases	PM _{2.5}	gases	PM _{2.5}	gases	PM _{2.5}
MER	4.98	0.21	4.43	0.2	4.88	0.2
TLA	4.96	0.21	4.08	0.19	4.44	0.18
FAC	4.89	-	3.88	-	4.23	-
NEZ	4.64	0.23	4	0.2	4.69	0.2
UAX	3.97	0.19	3.37	0.16	3.6	0.17
CCA	3.62	0.18	3.24	0.15	3.23	0.15
SFE	2.93	0.17	2.85	0.14	3.04	0.13

La figura 22 muestra el perfil de exposición ambiental anual para la estación TLA para el año 2019, la cual tuvo la mayor exposición a lo largo de dicho año; en ella se observa que la exposición a lo largo del año varía siendo mayor durante los meses fríos y secos (diciembre, enero, febrero y marzo) y menor durante los meses que comprenden la temporada de lluvias en la CDMX (junio-octubre).

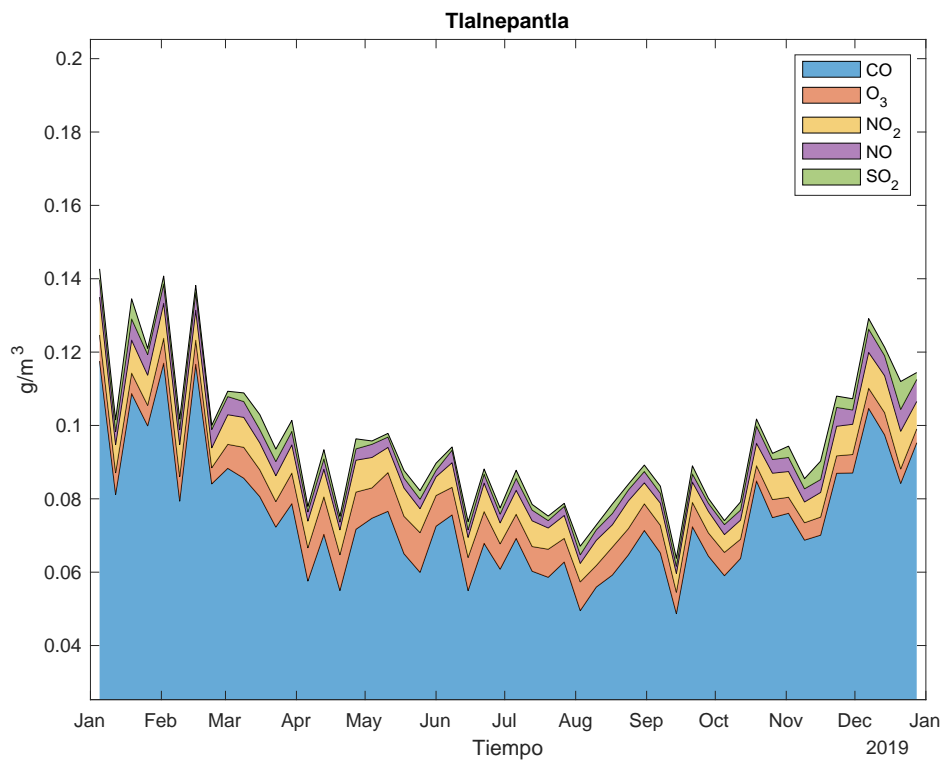


Figura 22. Perfil de exposición ambiental anual para la estación TLA, 2019.

Conforme a la figura 23, para la exposición a $PM_{2.5}$, se aprecia que durante los meses de noviembre a febrero la exposición es mayor, esto coincide con la temporada de partículas que se presenta en estos meses debido a la influencia de baja temperatura y mayor estratificación de la atmósfera en la CDMX generando una contracción en la capa de mezcla impidiendo una correcta dispersión de los contaminantes. El comportamiento durante el resto del año es similar con la excepción de un “pico” en el mes de mayo derivado de un evento extraordinario de partículas que se presentó en la CDMX durante dicho mes a causa de la alta ocurrencia de incendios en la Sierra de Guerrero durante este periodo (CAME,2019).

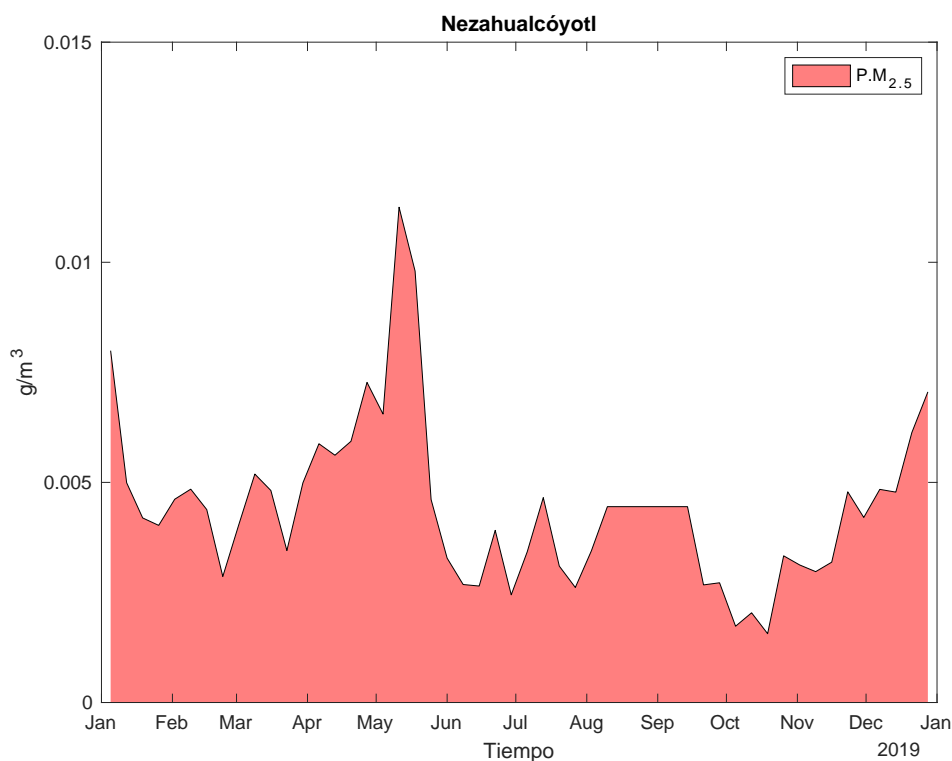


Figura 23. Perfil de exposición ambiental anual a $PM_{2.5}$, 2019

Los perfiles tanto para gases como para partículas son similares durante los 3 años de estudio, los cuales se encuentran dentro del anexo B del presente documento.

Las Figuras 24, 25 y 26 muestran la exposición ambiental a gases lo largo de los años de estudio en la CDMX. Durante los tres años de estudio, la exposición menor se presentó en la estación SFE; 2.93, 2.85 y 3.04 $\text{g}\cdot\text{año}/\text{m}^3$ para 2019, 2020 y 2021 respectivamente, mientras que la mayor se presentó en TLA y MER para el año 2019 con una exposición de 4.96 y 4.98 $\text{g}\cdot\text{año}/\text{m}^3$ y MER para los años 2020 y 2021 con una exposición acumulada a lo largo del año de 4.43 y 4.88 $\text{g}\cdot\text{año}/\text{m}^3$ respectivamente. De manera general se aprecia que la exposición es menor en la zona sur de la capital mexicana y la mayor magnitud en exposición se presenta en la zona centro durante el periodo de análisis.

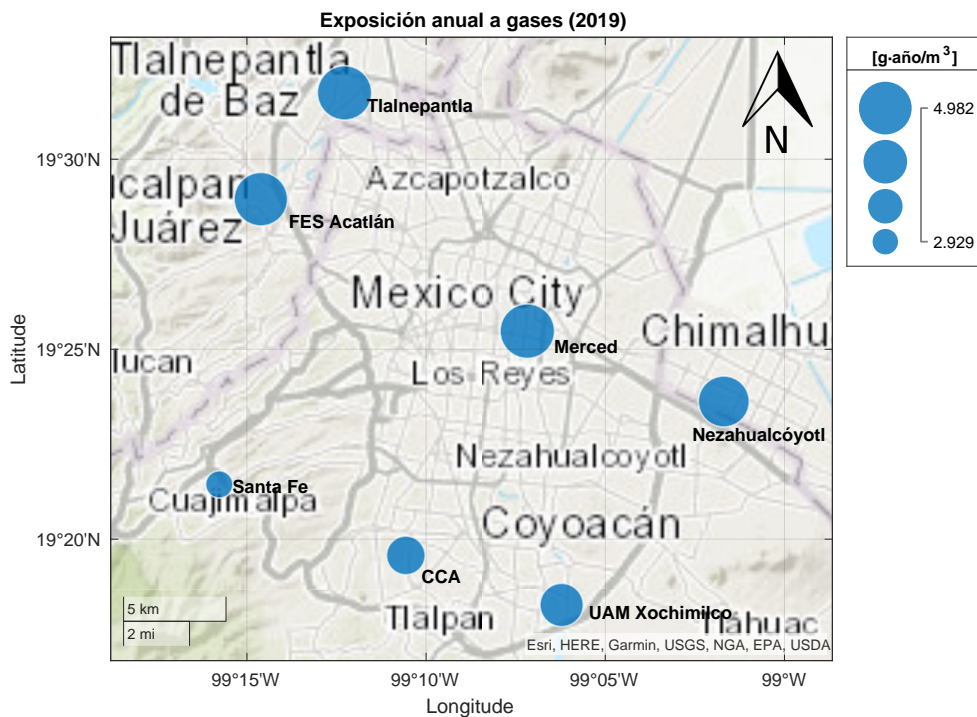


Figura 24. Ubicación de las estaciones de monitoreo empleadas y magnitud de la exposición ambiental anual para gases, 2019.

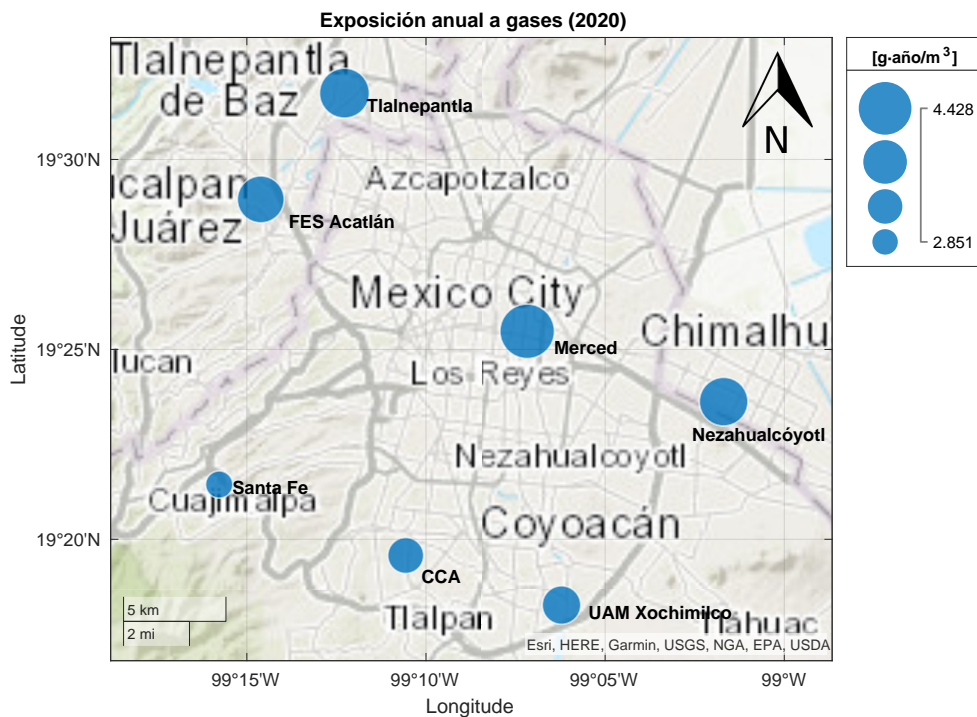


Figura 25. Ubicación de las estaciones de monitoreo empleadas y magnitud de la exposición ambiental anual para gases, 2020.

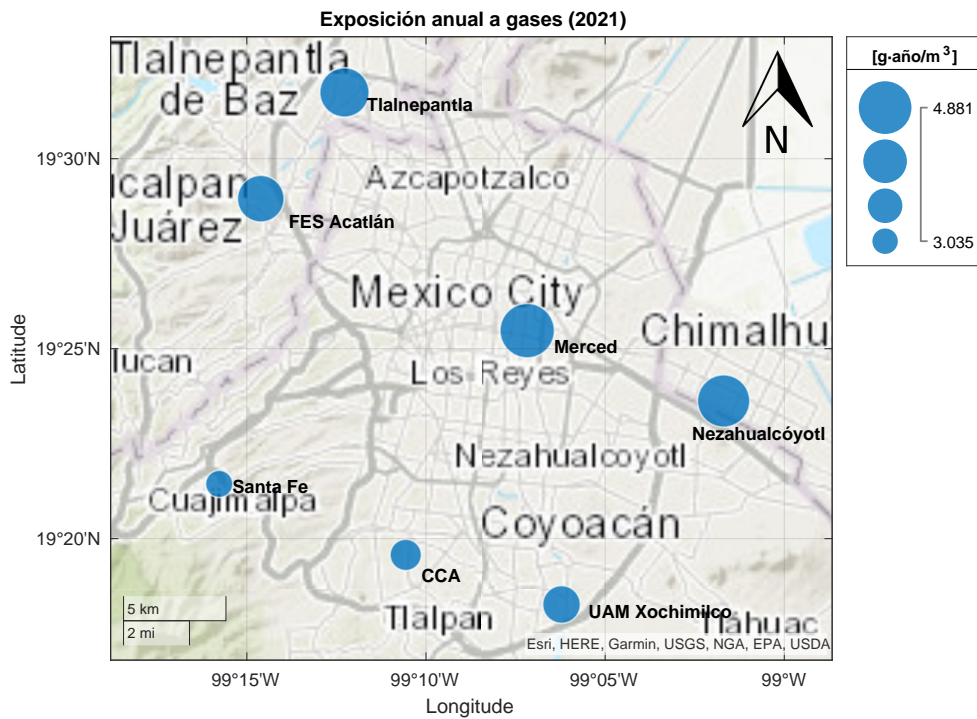


Figura 26. Ubicación de las estaciones de monitoreo empleadas y magnitud de la exposición ambiental anual para gases, 2021.

Las Figuras 27, 28 y 29 muestran la distribución de la exposición ambiental anual para el material particulado donde la estación NEZ fue la que tuvo los registros más altos con exposiciones de 0.23, 0.2 y 0.2 $\text{g}\cdot\text{año}/\text{m}^3$ para cada uno de los años analizados. En contraparte, la estación SFE registró los valores más bajos para el mismo contaminante: 0.17, 0.14 y 0.13 $\text{g}\cdot\text{año}/\text{m}^3$ a lo largo de los tres años de análisis.

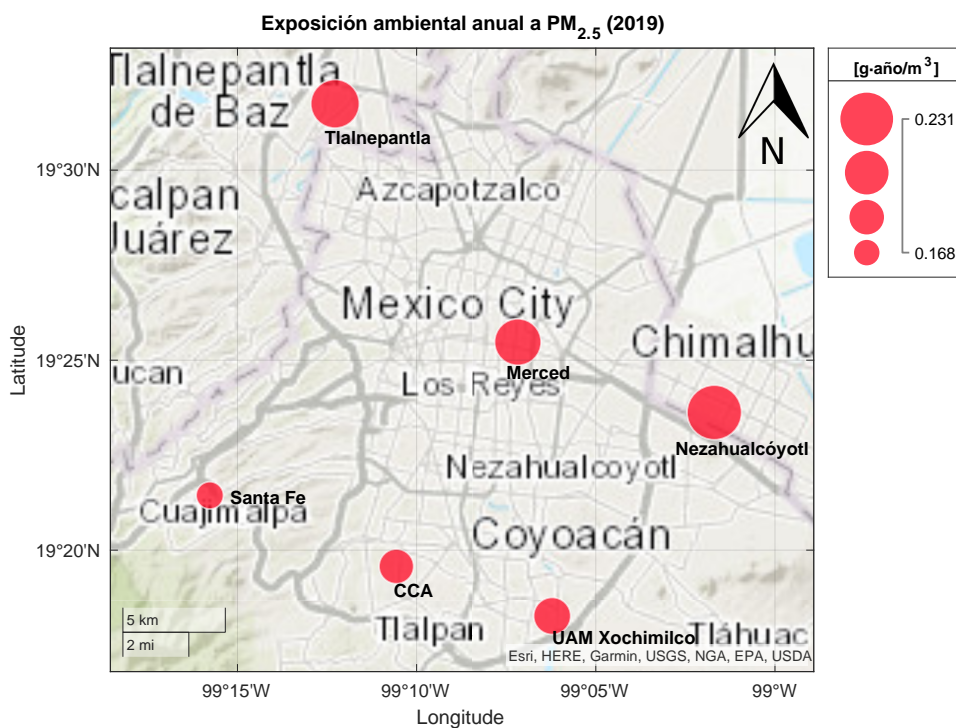


Figura 27. Ubicación de las estaciones de monitoreo empleadas y magnitud de la exposición ambiental anual para $\text{PM}_{2.5}$, 2019.

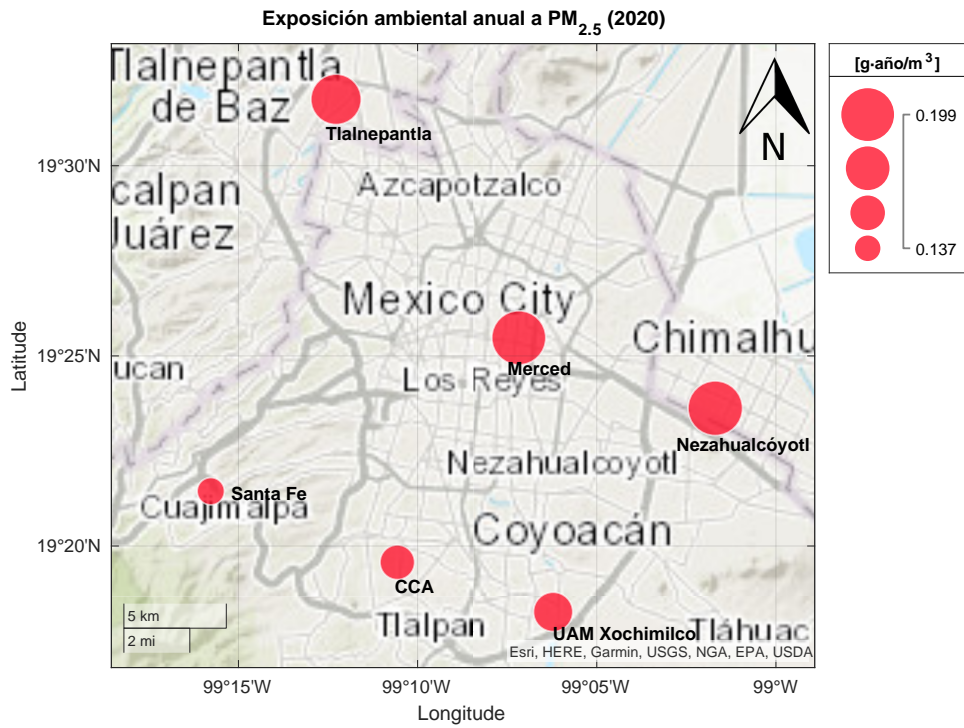


Figura 28. Ubicación de las estaciones de monitoreo empleadas y magnitud de la exposición ambiental anual para $PM_{2.5}$, 2020.

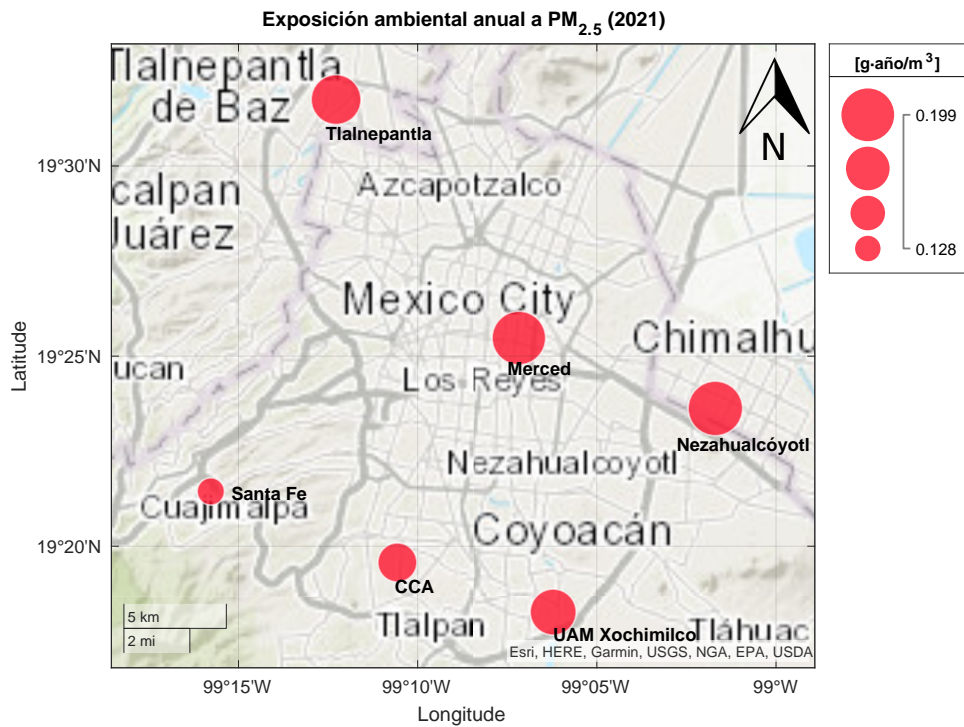


Figura 29. Ubicación de las estaciones de monitoreo empleadas y magnitud de la exposición ambiental anual para $PM_{2.5}$, 2021.

5.3 Análisis de varianza por años y estaciones

Tabla 8. Valores de p de prueba Kruskal-Wallis.

Valores de p (Kruskal Wallis)		
Contaminante	Gases	PM _{2.5}
Años	8.82E-13*	4.45E-06*
Estaciones	2.20E-16*	2.20E-16*

Nota: El símbolo * muestra la existencia de diferencias estadísticamente significativa entre los valores comparados.

Los resultados del análisis de varianza no paramétrica mediante la Prueba de Kruskal-Wallis y pruebas post hoc de Dunn para los años presentados en la Tabla 8 muestran que, existen diferencias estadísticamente significativas entre los años de estudio para ambos tipos de contaminantes. Las diferencias entre los años reflejan de manera general, el impacto que tuvo cada una de las diferentes etapas (prepandemia, confinamiento, “Nueva Normalidad”) en las concentraciones de contaminantes, tanto gases como partículas, a lo largo de la ciudad.

Respecto a las estaciones, se presentaron diferencias significativas entre ellas para ambos contaminantes como se aprecia en la Tabla 8; lo que remarca la presencia de sitios menos contaminados y más contaminados dentro de la ciudad.

5.3.1 Análisis de varianza por estación

Las Figuras 30 y 31 muestran la dispersión de los datos en cada una de las estaciones analizadas y el resultado del análisis de varianza no paramétrica mediante la Prueba de Kruskal-Wallis y pruebas post hoc de Dunn por estación. Los valores de p se pueden consultar en el anexo C del presente documento.

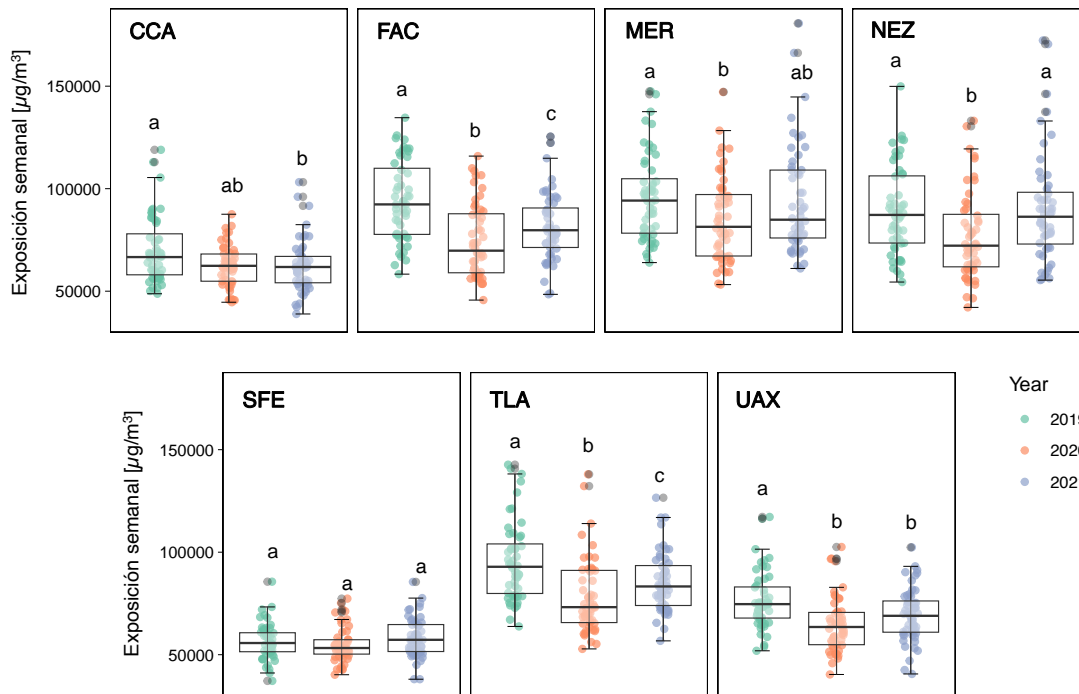


Figura 30. Dispersión y resultados del análisis de varianza para gases

La figura 30 muestra los diferentes escenarios que se presentaron para los gases en cada una de las estaciones, siendo estos diferentes en cada una de ellas. Se observa que en la estación CCA, se presentó una diferencia significativa entre los años 2019 y 2021. En las estaciones FAC y TLA, ubicadas en la zona Noreste dentro de la red de Monitoreo (SEDEMA, 2021), se presentaron diferencias significativas para los tres años de estudio. La estación MER presentó diferencias significativas entre los años 2019 y 2020, mientras que el año 2021 no presentó significancia respecto a los dos años anteriores. La estación NEZ, muestra cantidades de gases similares para los años 2019 y 2021, presentando diferencias significativas para el análisis del año 2020 contra los dos restantes. En la estación UAX se presentaron diferencias significativas entre el año prepandemia (2019) y los años posteriores. Contrario a lo reflejado en el resto de las estaciones, en la estación SFE no existieron diferencias significativas.

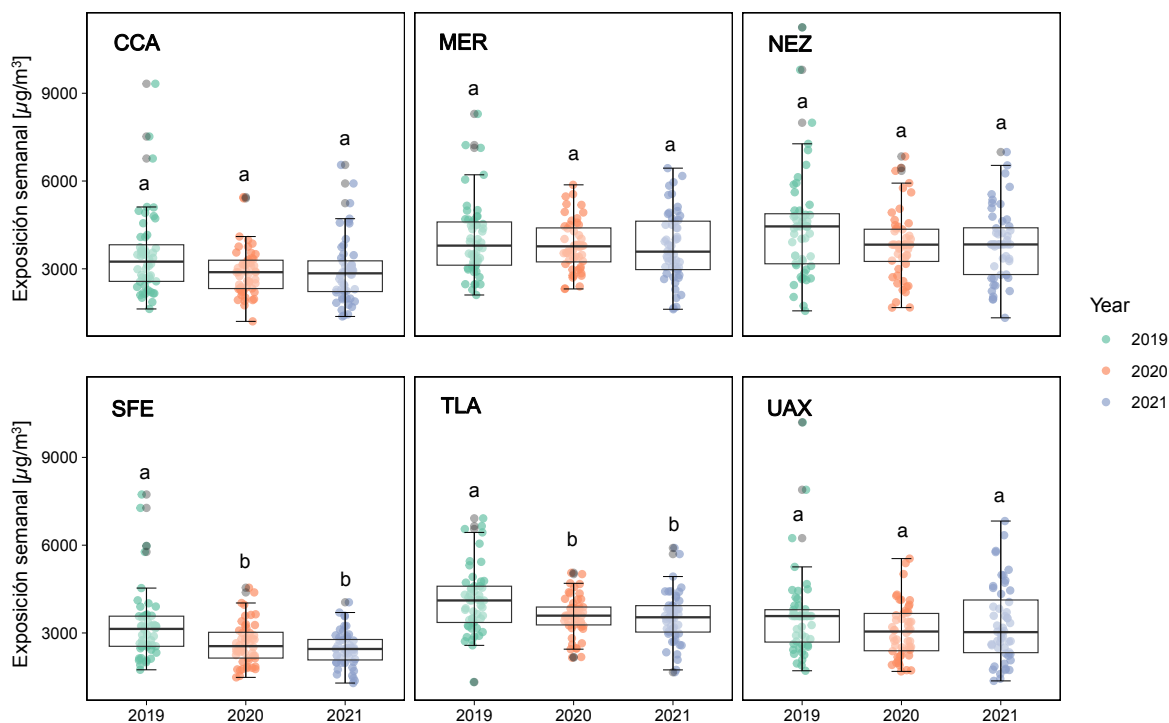


Figura 31. Dispersión y resultados del análisis de varianza para $PM_{2.5}$.

Por su parte en la figura 31, se aprecia que una mayor similitud entre los años en la dispersión de los datos para el $PM_{2.5}$. Las estaciones CCA, MER, NEZ y UAX no presentaron diferencias significativas en ninguno de los años de estudio. Las estaciones SFE y TLA presentaron diferencias significativas en el año 2019 respecto a los dos años posteriores.

5.4 Dosis inhalada diaria y anual

Las dosis inhaladas diaria y anual consideran las tasas de ventilación para cada uno de los grupos conforme a la tabla 2. Asimismo, se considera que las personas que viven cerca de cada estación permanecen todo el tiempo dentro del radio de incidencia (1 km); es decir se asume una población estática. El radio de incidencia de 1 km se empleó para mantener la homogeneidad de la población que se encuentra dentro de este y evitar que la interferencia de estos en otras estaciones,

además de respetar la representatividad de cada uno de los contaminantes como se muestra en la tabla 3.

Las Tablas 9 y 10 muestran las dosis inhaladas por sector poblacional para gases y partículas respectivamente. En ellas se muestra la masa de contaminantes inhalados en cada una de las estaciones siendo la estación MER donde la población tiende a inhalar una mayor cantidad de gases y la estación NEZ es el sitio donde se presenta la inhalación de mayor masa de material particulado. En contraparte, SFE presenta la dosis de inhalación más baja por parte de la población. El grupo que por su anatomía inhala una mayor dosis en términos masa es el compuesto por los masculinos mayores a 12 años.

El patrón es el mismo para la inhalación de gases anual, pasando de las decenas de gramos para los menores a 2 años a las centenas de gramos para la inhalación de gases en los adultos mayores como se muestra en la tabla 9. La masa de $PM_{2.5}$ inhalada es sensiblemente menor con valores menores a un gramo en los menores de 2 años y valores entre 2 y 3 g para adultos mayores conforme a las tablas 11 y 12.

Tabla 9. Carga diaria de contaminantes gaseosos por grupo poblacional

Estación	0-2 años [mg]			3-11 años [mg]			+12 años Femenino [mg]			+ 12 años Masculino [mg]		
	2019	2020	2021	2019	2020	2021	2019	2020	2021	2019	2020	2021
CCA	36.82	32.86	33.41	144.92	129.35	131.49	206.80	184.59	187.64	210.72	188.09	191.19
MER	50.16	44.90	50.12	197.43	176.74	197.28	281.73	252.22	281.53	287.07	256.99	286.86
NEZ	47.33	40.74	48.43	186.29	160.34	190.62	265.84	228.81	272.03	270.87	233.15	277.18
SFE	29.92	28.79	30.76	117.76	113.31	121.07	168.05	161.70	172.77	171.23	164.76	176.05
TLA	50.46	40.90	45.51	198.63	160.99	179.12	283.45	229.74	255.61	288.82	234.09	260.45
UAX	40.47	34.27	36.46	159.30	134.89	143.50	227.32	192.49	204.78	231.62	196.14	208.66
FAC	49.08	38.99	43.17	193.18	153.49	169.93	275.67	219.03	242.50	280.89	223.18	247.09

Tabla 10. Carga diaria de contaminantes particulados menor a 2.5 µm por grupo poblacional

Estación	0-2 años [mg]			3-11 años [mg]			+12 años Femenino [mg]			+ 12 años Masculino [mg]		
	2019	2020	2021	2019	2020	2021	2019	2020	2021	2019	2020	2021
CCA	1.90	1.59	1.60	7.46	6.25	6.28	10.65	8.91	8.96	10.85	9.08	9.13
MER	2.17	2.04	2.04	8.55	8.01	8.05	12.20	11.43	11.48	12.43	11.65	11.70
NEZ	2.42	2.07	2.11	9.52	8.15	8.32	13.59	11.63	11.87	13.85	11.85	12.09
SFE	1.77	1.43	1.30	6.95	5.63	5.12	9.91	8.04	7.31	10.10	8.19	7.45
TLA	2.23	1.95	1.92	8.77	7.66	7.55	12.51	10.93	10.77	12.75	11.14	10.98
UAX	1.98	1.66	1.78	7.80	6.54	7.00	11.14	9.34	9.99	11.35	9.51	10.18

Tabla 11. Carga anual de contaminantes gaseosos por grupo poblacional

Estación	0-2 años [g]			3-11 años [g]			+ 12 años femenino [g]			+ 12 años masculino [g]		
	2019	2020	2021	2019	2020	2021	2019	2020	2021	2019	2020	2021
CCA	13.63	12.18	12.16	53.63	47.93	47.87	76.54	68.40	68.31	77.99	69.70	69.61
MER	18.73	16.65	18.35	73.74	65.53	72.23	105.23	93.51	103.08	107.22	95.28	105.03
NEZ	17.43	15.03	17.64	68.60	59.15	69.43	97.89	84.42	99.07	99.75	86.01	100.95
SFE	11.01	10.72	11.41	43.34	42.20	44.92	61.85	60.22	64.11	63.02	61.36	65.32
TLA	18.67	15.36	16.69	73.47	60.46	65.70	104.84	86.27	93.75	106.83	87.91	95.53
UAX	14.94	12.68	13.53	58.81	49.93	53.26	83.93	71.25	76.00	85.52	72.60	77.44
FAC	18.37	14.59	15.90	72.30	57.42	62.57	103.18	81.93	89.30	105.13	83.49	90.99

Tabla 12. Carga anual de contaminantes particulados menor a 2.5 µm por grupo poblacional

Estación	0-2 años [g]			3-11 años [g]			+ 12 años Femenino [g]			+ 12 años Masculino [g]		
	2019	2020	2021	2019	2020	2021	2019	2020	2021	2019	2020	2021
CCA	0.68	0.56	0.56	2.68	2.22	2.21	3.83	3.17	3.15	3.90	3.23	3.21
MER	0.78	0.74	0.71	3.08	2.92	2.81	4.40	4.17	4.01	4.48	4.25	4.08
NEZ	0.87	0.75	0.73	3.42	2.94	2.86	4.89	4.20	4.08	4.98	4.28	4.15
SFE	0.63	0.52	0.47	2.49	2.03	1.85	3.56	2.90	2.64	3.62	2.96	2.69
TLA	0.80	0.70	0.68	3.16	2.76	2.66	4.51	3.94	3.79	4.60	4.02	3.87
UAX	0.70	0.60	0.63	2.75	2.36	2.49	3.93	3.37	3.55	4.00	3.43	3.62

5.4 Densidad poblacional

La figura 32 muestra la distribución de las estaciones y su radio de incidencia a lo largo de la Zona Metropolitana del Valle de México. La mayor densidad poblacional se presentó en NEZ, esto concuerda con lo observado en la figura 4 donde se observa que en la totalidad del área de incidencia se encuentra una zona habitacional. En dicha área se calcula viven aproximadamente 67,112 personas. La densidad más baja se presentó en FAC que se encuentra rodeada por áreas verdes y las instalaciones de la FES Acatlán como se aprecia en la imagen satelital de la figura 2. La estimación poblacional en esta estación fue de 13,670 personas.

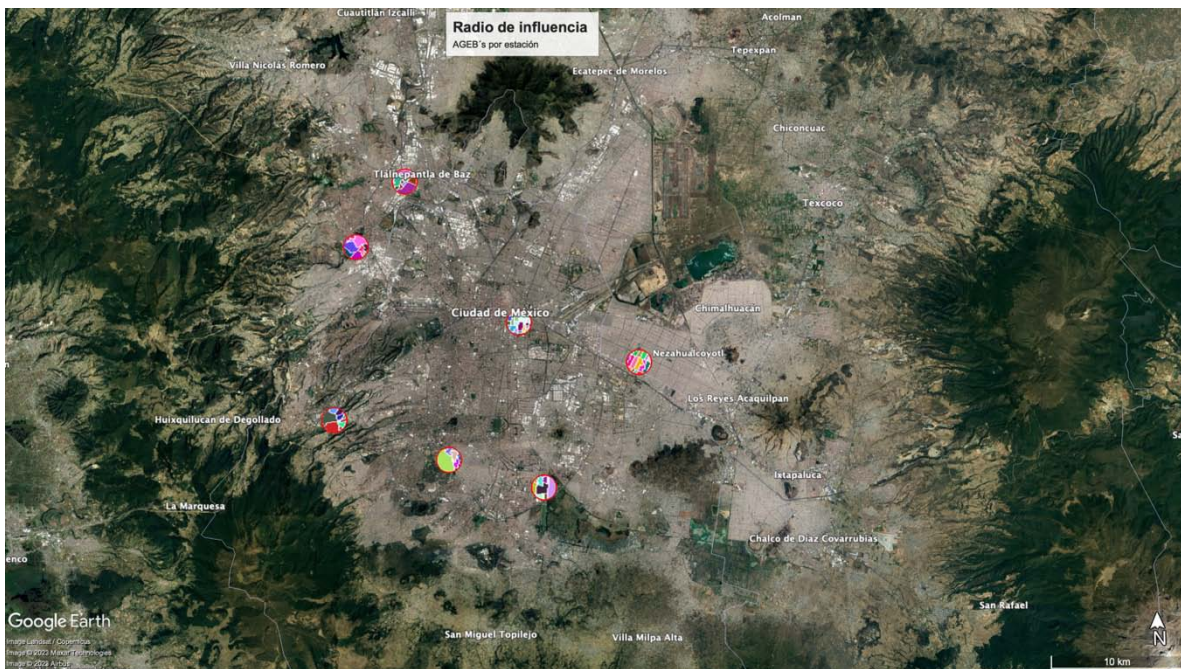


Figura 32. Ubicación de estaciones y radio de incidencia

La figura 33 muestra la población total estimada en el área de incidencia de cada estación, se observa que las estaciones FAC, SFE y TLA presentan una población menor a los 20,000 habitantes seguida de UAX, MER y CCA con densidades menores a los 40,000 habitantes y por último NEZ con una población mayor a los 60,000 individuos.

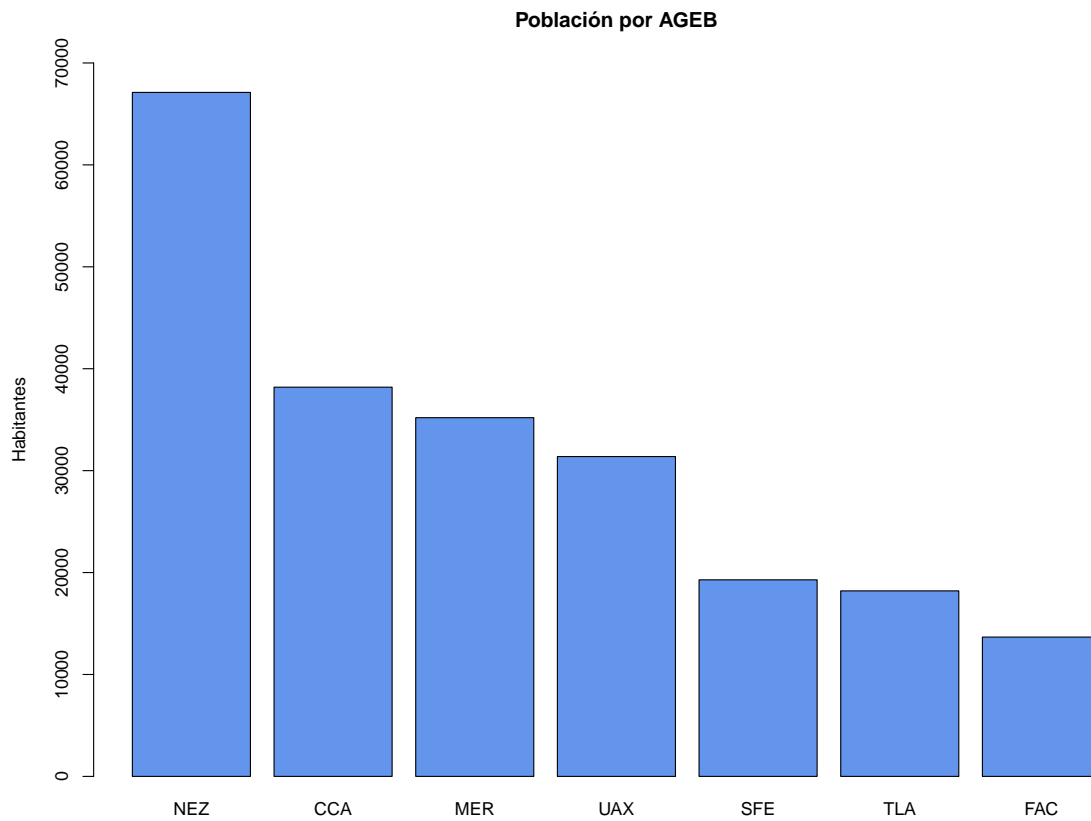


Figura 33. Población total estimada dentro de área de incidencia por estación.

La figura 34 muestra el desglose de la población en función de los grupos poblacionales formados; se aprecia que el grupo con mayor representación corresponde a las mujeres mayores a 12 años. La información por AGEB en cada estación se encuentra en el anexo C del presente documento.

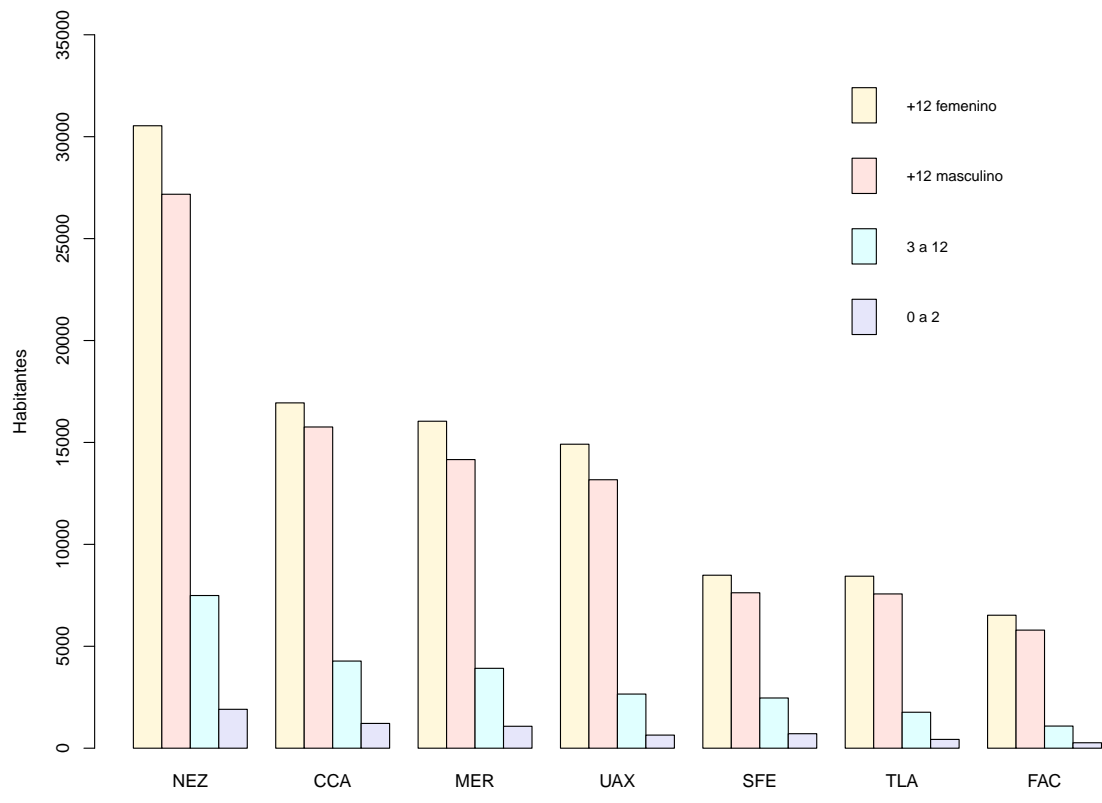


Figura 34. Población estimada por sector dentro del área de incidencia por estación.

Capítulo 6. Discusión

6.1 Análisis de variancia

6.1.1 Análisis de varianza en gases

Al considerar las concentraciones de gases por año, los resultados del análisis de varianza mostraron el impacto que tuvieron las medidas de contención para reducir la transmisión del virus SARS-COV-2 en la población de la Ciudad de México. Sin embargo, el comportamiento no fue el mismo en las estaciones analizadas probablemente debido a la dinámica en el área de incidencia de cada una de ellas.

En las estaciones TLA y FAC, en el noroeste de la zona de monitoreo, se presentaron diferencias significativas entre los tres años de estudio, lo cual puede deberse al impacto que tuvo cada una de las medidas de contención en la actividad industrial presente en las cercanías de la estación TLA, pasando de un cese drástico en operaciones durante 2020, caracterizado por el descenso en las concentraciones de gases, a un retorno gradual a las actividades sociales y económicas durante 2021 que provocó un incremento en las concentraciones sin alcanzar los niveles prepandemia. El comportamiento de los gases fue similar en la estación FAC, con un descenso significativo en las concentraciones en 2020 respecto a 2019 y un aumento significativo en estas durante 2021 sin llegar a los niveles de 2019, probablemente favorecido por las actividades a distancia que prevalecieron en las instalaciones de la UNAM durante el año 2021 como se menciona en el Boletín UNAM-DGCS-1057 (UNAM, 2022)

En la estación CCA se presentaron diferencias significativas entre el año 2019 y 2021, en este último año se presentó un comportamiento diferente al esperado con un descenso en las concentraciones respecto a 2020, año donde se presentaron las mayores restricciones de movilidad. El no retorno a las aulas favoreció este comportamiento, al estar inmersa la estación dentro de las instalaciones de la UNAM. El año 2020 no presentó diferencias significativas respecto a los otros años

de estudio, presentando valores en las concentraciones entre las registradas en 2019 y 2021 como se aprecia en la Figura 30.

La estación MER presentó diferencias significativas entre los años 2019 y 2020. Al ubicarse dentro de uno de los centros económicos de la capital del país, la instauración de medias de contención del virus provocó un descenso significativo en las concentraciones registradas en 2020 respecto a 2019. Con la reapertura económica se presentó un aumento en las concentraciones en 2021 sin llegar a los niveles prepandemia producto del aumento de actividad en esta zona de la ciudad.

En la estación NEZ se presentó un comportamiento diferente respecto al resto de las estaciones probablemente favorecido por la alta densidad demográfica. Las concentraciones durante el año 2020 fueron significativamente diferentes tanto para 2019 como para 2021, lo cual indica que a pesar de las medidas de movilidad reducida durante el año 2021 se presentaron concentraciones similares a las presentadas antes del confinamiento, lo cual como se mencionó previamente puede estar íntimamente ligado con la densidad demográfica la cual es considerablemente mayor respecto al resto de estaciones aunado a un desplazamiento continuo de la zona al ser una zona residencial.

En la estación UAX, los niveles durante los años 2020 y 2021 fueron similares, presentando diferencias significativas con el año 2019. Al encontrarse dentro de las instalaciones de la UAM-Xochimilco, las actividades escolares en línea pudieron influir para mantener niveles más bajos de contaminantes gaseosos durante el año 2021.

La estación SFE no presentó significancia en ninguno de los tres años de estudio. El impacto de las medidas de confinamiento es menor al ser la estación con las menores concentraciones de contaminantes gaseosos para el presente estudio.

6.1.2 Análisis de varianza en PM_{2.5}

El análisis realizado para el PM_{2.5} no mostró diferencias significativas para la mayoría de las estaciones durante el periodo analizado. Las estaciones SFE y TLA fueron las únicas que presentaron diferencias significativas para el año 2019 respecto a los dos años posteriores. Las estaciones SFE y TLA se caracterizaron por poseer las densidades demográficas más bajas del estudio, junto a la estación FAC. Considerando que durante los años 2020 y 2021 existieron fuertes restricciones de movilidad, podemos inferir que las concentraciones de PM_{2.5} están influenciadas por las emisiones locales, teniendo como resultado un descenso significativo en las concentraciones de las estaciones con el menor número de habitantes dentro del radio de incidencia de cada una de las estaciones.

Después de realizar el análisis de población dentro del radio de incidencia, las estaciones NEZ, CCA, MER y UAX presentaron densidades demográficas considerablemente mayores respecto a TLA y SFE, por lo que el descenso esperado debido al confinamiento no se vio reflejado en los datos.

6.2 Diferencias porcentuales en la exposición ambiental diaria entre los años de estudio.

A lo largo de los tres años estudiados se encontró que derivado de la pandemia a causa de la Covid-19, durante el año 2020 se presentó un descenso en la exposición (gases y partículas) respecto al año 2019, año previo a la pandemia. La estación que presentó el mayor cambio en la exposición diaria a gases respecto al año 2019 fue la estación FAC con una disminución cercana a 21%, seguidas de las estaciones TLA y UAX con 19 y 15% aproximadamente. El menor cambio se presentó en la estación SFE con una diferencia de apenas de 4% entre los años 2019 y 2020.

Para el año 2021 el regreso gradual a las actividades generó que la exposición diaria entre el año 2019 y 2021 fuera similar. La estación FAC presentó el mayor decremento, alrededor de 12%. Por otra parte, hubo estaciones que presentaron un

ligero incremento alrededor del 2 y 3% (NEZ y SFE). Las diferencias entre el año 2019 y los años posteriores para cada estación se aprecian en la tabla 12. Durante los años 2020 y 2021 la estación NEZ presentó una diferencia alrededor del 16%; mientras que en las estaciones MER, TLA y FAC la diferencia fue cercana al 10%. Las estaciones CCA y SFE presentaron diferencias menores al 7 % conforme a lo observado en la Tabla 13.

Tabla 13. Exposición ambiental promedio diaria a gases en [$\mu\text{g}\cdot\text{día}/\text{m}^3$] y diferencia porcentual entre el año 2019 y los años 2020 y 2021.

Estación	2019	2020	2021	Diferencia % 2019-2020	Diferencia % 2019-2021	Diferencia % 2020-2021
TLA	13420.94	10877.88	12102.81	-18.95	-9.82	-10.12
MER	13339.72	11942.14	13329.81	-10.48	-0.07	-10.41
FAC	13052.37	10370.67	11482.02	-20.55	-12.03	-9.68
NEZ	12587.08	10833.93	12879.98	-13.93	2.33	-15.89
UAX	10763.22	9114.33	9696.09	-15.32	-9.91	-6
CCA	9791.9	8740.1	8884.45	-10.74	-9.27	-1.62
SFE	7956.99	7656.27	8180.58	-3.78	2.81	-6.41

Respecto al $\text{PM}_{2.5}$, durante los dos años posteriores al 2019 se presentó un descenso considerable en la exposición diaria promedio a este contaminante en todas las estaciones lo cual puede estar atribuido al descenso en el tráfico vehicular impuesto por la pandemia, al ser esta una de las principales fuentes de partículas en la ciudad. La estación que presentó el mayor porcentaje de disminución fue SFE con un 19% para el 2020 y un 26% para 2021. La estación que presentó los valores más bajos de disminución fue MER con un valor aproximado de 6 % para ambos años como lo muestra la tabla 13. Para el resto de las estaciones, el porcentaje en que disminuyó la exposición fue entre el 10 y el 16%. La comparación entre el año 2020 y 2021 no mostró grandes diferencias, siendo estas menores al 10 % en todas las estaciones como se aprecia en la Tabla 14.

Tabla 14. Exposición ambiental promedio diaria a $PM_{2.5}$ en $[\mu\text{g}\cdot\text{día}/\text{m}^3]$ y diferencia porcentual entre el año 2019 y los años 2020 y 2021.

Estación	2019	2020	2021	Diferencia % 2019-2020	Diferencia % 2019-2021	Diferencia % 2019-2021
NEZ	643.58	550.65	562	-14.44	-12.68	-2.02
TLA	592.3	517.62	510.08	-12.61	-13.88	1.48
MER	577.45	541.24	543.79	-6.27	-5.83	-0.47
UAX	527.36	442	473	-16.19	-10.31	-6.55
CCA	504.14	422.11	424.31	-16.27	-15.83	-0.52
SFE	469.46	380.69	346.24	-18.91	-26.25	9.95

6.3 Exposición ambiental total durante los años 2019, 2020 y 2021

Con la finalidad de comparar la exposición ambiental entre las diferentes zonas de la CDMX, se tomó como referencia la estación con la menor exposición anual a gases y partículas (SFE) para evaluar la magnitud de la exposición en las estaciones restantes como se muestra en la Tabla 15. Para ello se sumaron las áreas bajo la curva para los tres años.

Tabla 15. Diferencia porcentual en exposición ambiental anual para gases 2019-2021 con referencia a la estación SFE.

Estación	gases $[\text{g}\cdot\text{año}/\text{m}^3]$	Diferencia % a gases
MER	14.29	62.12
TLA	13.49	53.01
NEZ	13.32	51.14
FAC	12.99	47.39
UAX	10.95	24.17
CCA	10.1	14.54
SFE	8.81	-

La Tabla 15 muestra que, porcentualmente, la exposición a gases durante el periodo 2019-2021 para MER fue 62.12% más alta respecto SFE, que fue la que registro la exposición más baja. MER se ubica en el centro de la CDMX. Las estaciones que se ubican en el Norte y Oriente también presentaron diferencias importantes respecto a SFE; en el Norte, TLA y FAC presentaron una exposición de 53.01% y

47.39 % mayor para el mismo periodo. NEZ ubicada en el oriente también presentó una diferencia significativa de acuerdo con la Prueba de Krustal-willis, con una exposición que sobrepasa a la estación SFE en un 51.14 %.

La situación es diferente en las estaciones ubicadas en el sur de la ciudad ya que en ellas las diferencias fueron menores; 24.17% para la estación UAX y 14.54% para la estación CCA. Estas diferencias muestran que la exposición a gases en la zona sur de la CDMX es sensiblemente menor respecto al resto de la ciudad tal como se muestra en la figura 35.

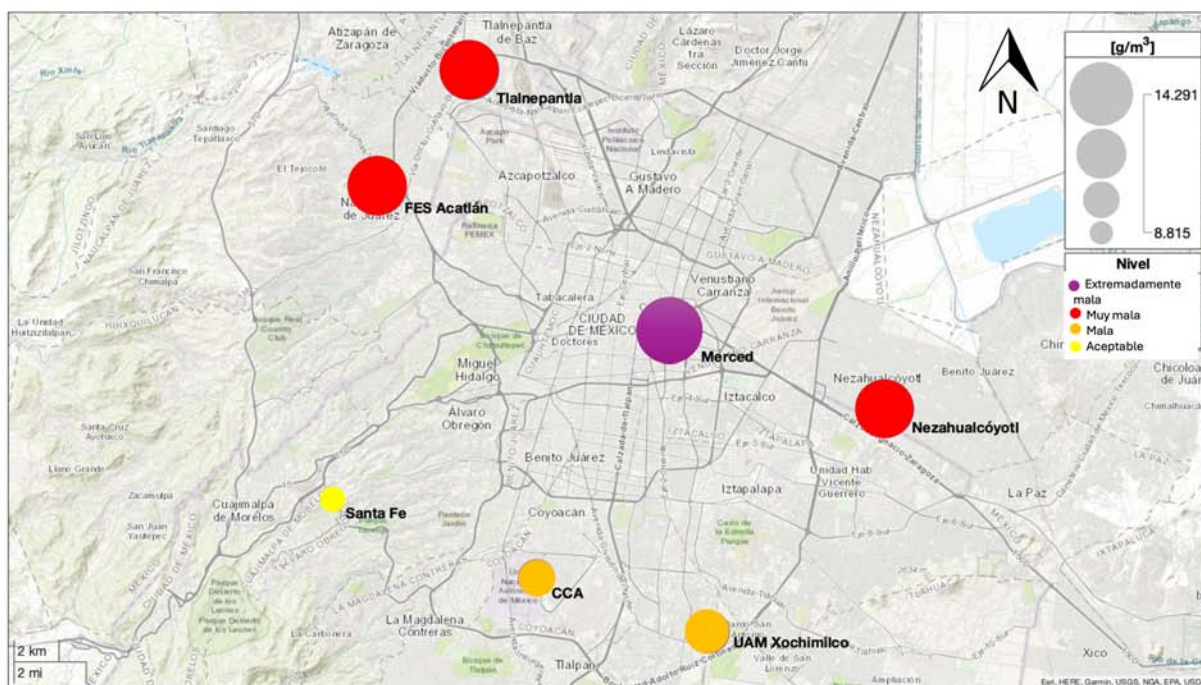


Figura 35. Exposición ambiental a gases para el periodo 2019-2021.

Respecto al PM_{2.5}, la Tabla 16 muestra que la estación SFE presentó la menor exposición acumulada durante el periodo comprendido entre los años 2019-2021.

Tabla 16. Diferencia porcentual en exposición ambiental anual para $PM_{2.5}$ 2019-2021 con referencia a la estación SFE.

Estación	$PM_{2.5}$ [$g \cdot \text{año}/m^3$]	Diferencia % a partículas
NEZ	0.63	45.68
MER	0.6	39.01
TLA	0.58	34.53
UAX	0.52	19.71
CCA	0.48	11.74
SFE	0.43	-

El sitio NEZ presentó la mayor exposición a dicho contaminante siendo 45.68% mayor respecto a SFE. Las zonas centro (MER) y norte (TLA) presentaron porcentajes de exposición similares respecto a SFE con un 39 y 34.5% respectivamente. Al igual que en la exposición a gases, la exposición a $PM_{2.5}$ es menor en las estaciones en el sur de la ciudad. Respecto a SFE estas estaciones presentan porcentajes de exposición más bajos que el resto de las estaciones. CCA presenta una exposición de casi 12% respecto a SFE, mientras que UAX excede la exposición más baja en un 19.71 %. La figura 36 muestra las diferencias en la exposición a $PM_{2.5}$ en este periodo a lo largo de la CDMX.

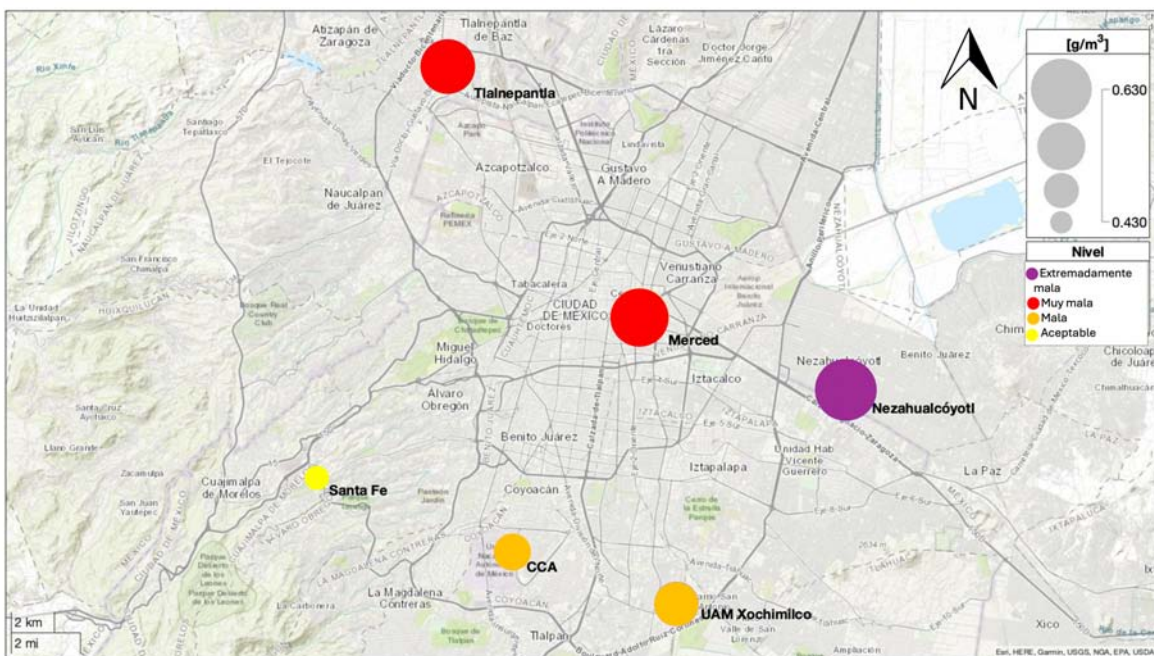


Figura 36. Exposición ambiental a $PM_{2.5}$ para el periodo 2019-2021.

6.4 Dosis inhalada y densidad poblacional

Las Figura 37 muestra las diferencias porcentuales en la dosis inhalada para cada una de las estaciones respecto a la estación SFE para gases. La Figura 37 muestra que las diferencias porcentuales en la dosis inhalada en cada estación fueron mayores en general para el año 2019, donde se desarrollaron todas las actividades sociales de manera ordinaria antes de la llegada del SARS-COV-2 a México. Conforme a los datos obtenidos, la población en las estaciones MER y TLA respiraron 70% más contaminantes en términos de masa respecto a aquellos que radican en la periferia de la estación SFE, seguido de las estaciones FAC y NEZ con un 67% y 58% respectivamente. Las estaciones UAX y CCA presentaron diferencias porcentuales menores al resto de estaciones en torno a los 36 y 24% respectivamente.

Para el año 2020, caracterizado por el confinamiento, las diferencias porcentuales en la masa inhalada por los habitantes respecto a la estación SFE se contrajeron producto de la reducción en las actividades sociales y económicas. La estación MER presentó la mayor diferencia porcentual con un 55%, seguida de TLA, NEZ Y FAC con un 43, 40 y 36 % respectivamente, cifras menores en comparación del año anterior. Las estaciones UAX y CCA presentaron diferencias significativas respecto a SFE menores al 20%.

Para el año 2021, llaman la atención las estaciones NEZ y MER al ser aquellas donde se presentó una diferencia porcentual similar al año prepandemia. La alta densidad demográfica que se presenta en la estación NEZ podría ser el factor que explique este comportamiento. Con la reapertura de algunas actividades sociales y económicas durante 2021 y la relajación de las medidas para evitar la dispersión de la COVID-19 se reactivaron algunos puntos estratégicos de la ciudad. El Centro Histórico es uno de ellos, sitio donde se encuentra la estación MER, lo cual explicaría este comportamiento. El resto de las estaciones presentó diferencias similares al año 2020.

Considerando los datos obtenidos, en poco menos de 4 años, en la estación MER se habrá duplicado la cantidad en masa de contaminantes gaseosos inhalados respecto a la estación SFE en el periodo de estudio. Esta situación se presentaría a los 4 años en las estaciones TLA, NEZ y FAC. Aunado a esto, las estaciones MER y NEZ presentan una población mayor de personas dentro del radio de incidencia elegido, esto tiene como resultado un mayor número de personas expuestas a cargas más altas de contaminantes. Para que el patrón antes mencionado se repitiera en las estaciones CCA y UAX tendrían que pasar más de 5 años por lo que no representan sitios de interés en términos de exposición a gases respecto a la estación SFE. Lo anterior remarca la desigualdad en términos de exposición a contaminantes gaseosos presentes en la CDMX, donde en la zona sur se respiran cantidades en masa considerablemente inferiores respecto a las demás regiones de la ciudad.

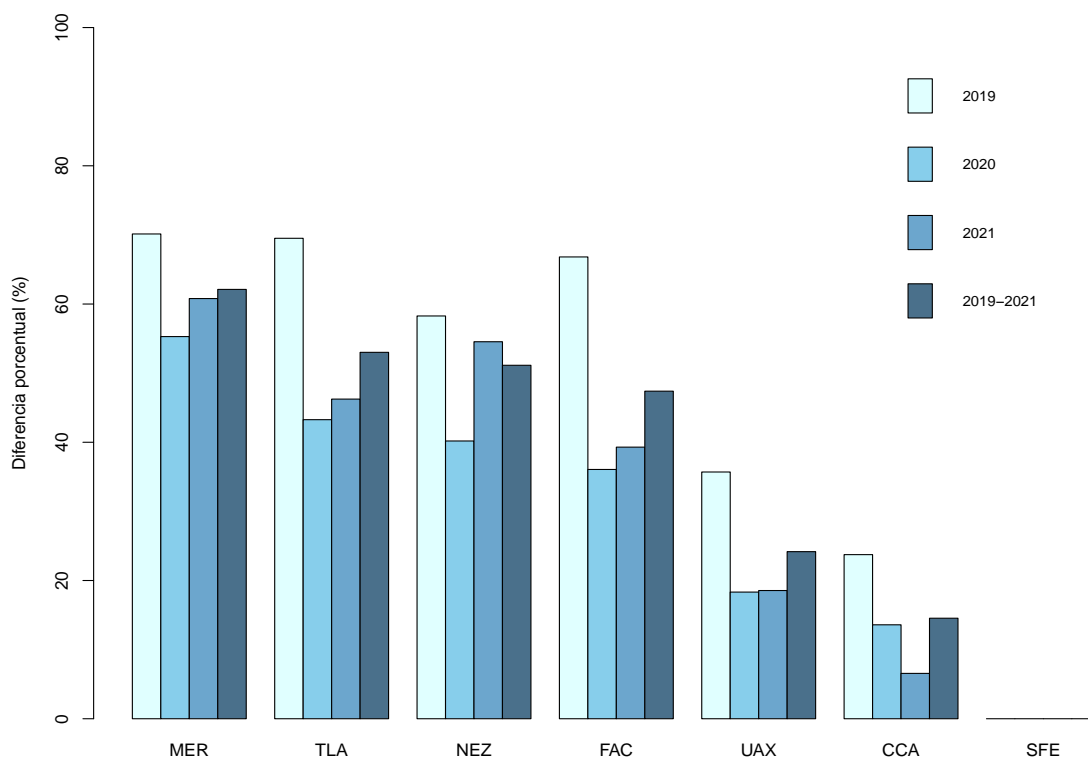


Figura 37. Diferencias porcentuales en la inhalación de gases respecto a estación SFE.

Las Figura 38 muestra las diferencias porcentuales en la dosis inhalada para cada una de las estaciones respecto a la estación SFE para $PM_{2.5}$. A diferencia de los gases, las diferencias entre las estaciones fueron menores para el año 2019, lo cual reafirma el papel que tienen las emisiones locales para este contaminante. La estación NEZ presentó la mayor diferencia cercana al 40%, seguida de las estaciones TLA y MER por encima del 20%. Por último, las estaciones UAX y CCA presentaron diferencias en la cantidad en masa de $PM_{2.5}$ inhalada respecto al sitio SFE en torno al 10%.

Con el confinamiento durante 2020, las diferencias porcentuales respecto a la estación SFE crecieron principalmente en las estaciones NEZ, TLA y MER situándose alrededor del 40%. La estación UAX presentó diferencias en torno al 20%, mientras que la estación CCA se situó en torno al 10%. Debido a la disminución drástica en la dinámica social, se asume que estas concentraciones están altamente influenciadas por el entorno local.

Las mayores diferencias se presentaron en el año 2021 con la reapertura a ciertas actividades sociales económicas. Nuevamente la estación NEZ, con mayor número de pobladores, presentó la mayor diferencia respecto a SFE siendo del 57%, seguida de las estaciones MER y TLA, sitios con alta actividad económica, con diferencias del 54 y 44% respectivamente. Por último, las estaciones CCA y UAX, inmersas en centros escolares que permanecieron prácticamente cerrados, presentaron as diferencias porcentuales más bajas siendo del 20% para UAX y 12% para CCA.

Considerando que el periodo de estudio que fue de tres años, el análisis de los datos sugiere que, en poco más de 4 años la población en NEZ habrá respirado el doble de $PM_{2.5}$ respecto a la estación SFE, siendo similar el tiempo para las estaciones MER y TLA. Al igual que en los gases, las estaciones CCA y UAX requerirán más de 5 años para alcanzar dichas cargas de $PM_{2.5}$.

Como se puede apreciar, las estaciones donde las personas respiran más contaminantes, tanto gases como partículas son NEZ, MER y TLA. Considerando la densidad poblacional en cada una de ellas es de particular interés la estación NEZ, ya que como se muestra en la figura 28, en dicha estación viven cerca de 5 veces más personas respecto a la FAC, zona con menor densidad poblacional lo cual puede derivar en un problema de salud pública al tener un gran número de personas expuestas a mayores dosis de contaminantes.

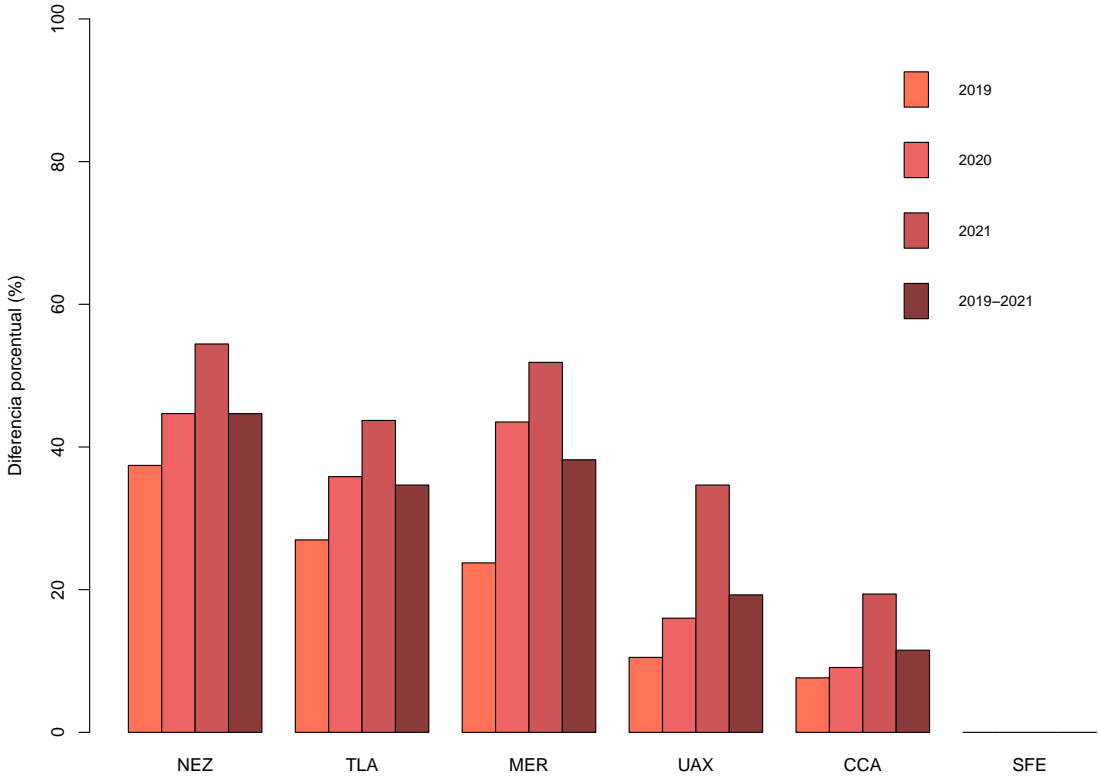


Figura 38. Diferencias porcentuales en la inhalación de $PM_{2.5}$ respecto a estación SFE.

6.5 Comparativa entre concentraciones ambientales en CDMX y legislación vigente (NOM y OMS)

Con la finalidad de proteger a las poblaciones de efectos en la salud derivado de la exposición a la contaminación del aire, se han fijado Límites en las concentraciones

de los contaminantes. A nivel mundial es la Organización Mundial de la Salud (OMS) emite estos estándares, mientras que en el territorio nacional estos se encuentran regulados a través de una serie de Normas Oficiales Mexicanas (NOM). La OMS ha propuesto como guías de referencia a 5 y 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$, anual y 24 h respectivamente, como concentraciones máximas permitidas en las que los riesgos a desarrollar enfermedades asociadas a este contaminante son bajas (WHO,2021). Comparativamente con estas guías, los datos muestran que ninguna de las estaciones cumple con estas directrices, tanto en el valor anual como para 24 h, considerando un día promedio. La excepción para la directriz de 24 h fue SFE, con un promedio diario de 14.43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Respeto a la directriz anual, el valor más bajo (11.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) duplica al valor establecido por la OMS y se presentó en SFE durante el año 2021. NEZ presentó concentraciones ambientales que cuaduplican y triplican los valores establecidos por dicho organismo mundial, lo cual hace suponer que las concentraciones presentes a lo largo de la ciudad representan un riesgo para la salud de todos los habitantes hablando del material particulado.

En México los valores límite están establecidos por la NOM-025-SSA1-2021, los cuales para el año 2022 son: 41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el promedio de 24 h y 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el promedio anual. Tomando como referencia estos valores, tenemos que la totalidad de estaciones analizadas durante el periodo 2019-2021 cumple con el criterio de 24 h, sin embargo, ninguna estación alcanza a satisfacer los límites anuales establecidos por la norma antes citada.

Respecto a los gases, el CO es el que más aporta en términos de masa, seguido de O_3 , NO_2 , NO y SO_2 , sin embargo, a pesar de ello no supera el límite establecido por la NOM-021-SSA1_2021 que regula dicho contaminante. La Ciudad de México presenta altos niveles de O_3 durante los meses de marzo a mayo durante la llamada “Temporada de Ozono” (CAME,2018), los cuales sobrepasan los valores establecidos por la NOM-020-SSA1-2021 durante dicho periodo detonando las contingencias ambientales. A pesar de su bajo aporte en términos de masa, el NO_2 en MER, NEZ, FAC y TLA supera el valor promedio anual marcado por la NOM-

023-SSA1-2021 a lo largo del periodo analizado, el cual a condiciones de presión y temperatura estándar es de $31.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo MER la que presenta los valores más altos con concentraciones por encima de los $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para este contaminante. La situación respecto a los valores indicados por la OMS supone un riesgo importante a la salud al ser el límite de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (WHO,2021). Respecto a los gases O_3 y NO_2 son los que superan los límites normados en promedio móvil de 8 horas y promedio anual respectivamente; el resto de los contaminantes gaseosos cumplen con lo establecido en las Normas Oficiales Mexicanas y los lineamientos de la OMS.

6.6 Posibles efectos de la exposición por zona y grupo de edad

El análisis de las concentraciones de los contaminantes, la determinación de la exposición total expresada en masa y la población asociada a cada zona tiene como objetivo asociar de mejor manera la exposición con sus posibles efectos en salud. Si bien nuestro estudio tiene algunos aspectos por considerar, como saber cuál es el porcentaje de esa población residente que pasa la mayor parte de su día en el radio de exposición calculado (1 km), el tipo de actividad, hábitos, condición de salud basal, entre otros. Conforme a lo anterior, el análisis hace énfasis en aquellos sectores de la población que pasa la mayor parte del día en los alrededores de su lugar de residencia. Dentro de ellos encontramos a los infantes, mujeres embarazadas y adultos mayores.

De acuerdo con lo descrito en secciones anteriores, las partículas representan un riesgo importante para la salud al no cumplir con los valores establecidos por la respectiva NOM ni las directrices de la OMS, sin embargo, algunos efectos pueden estar asociados o potenciados ante la presencia de contaminantes gaseosos.

Mette et al. (2023) encontraron una asociación a la incidencia de diabetes en personas mayores de 50 años, principalmente hombres, y una exposición a $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$, destacando el papel que juegan los factores ambientales en la incidencia de esta enfermedad en etapas adultas. Liu et al. (2019) y Yitshak Sade et al. (2023)

muestran una asociación entre la incidencia de Diabetes Mellitus tipo 2 y la exposición a largo plazo a $PM_{2.5}$ y NO_2 .

Miller et al. (2007) estudiaron el efecto de la exposición a $PM_{2.5}$ en mujeres en etapa postmenopáusicas, encontrando que un aumento de $10 \mu g/m^3$ en la exposición prolongada para este contaminante está asociado a un aumento de 24% en el riesgo de padecer un evento cardiovascular y un 76% de riesgo de muerte por este tipo de eventos en este grupo de personas.

Schwartz et al., (1996) mostraron que el aumento en $10 \mu g/m^3$ en $PM_{2.5}$ estaba relacionado con el incremento de 1.5 % de las muertes totales en seis ciudades de Estados Unidos, siendo la muerte por EPOC y cardiopatía isquémica las causas que presentaron un mayor incremento con un 3.3 y 2.1 % respectivamente. DeVries et al. (2017) asocian un incremento en el riesgo de EPOC de entre 2 y 3% por cada $10 \mu g/m^3$ de $PM_{2.5}$, NO_2 o SO_2 .

Mediante un estudio con ratas, Motesaddi Zarandi et al. (2021) encontraron que la exposición ambiental a $PM_{2.5}$ puede incrementar el riesgo de padecer Alzheimer, el cual se puede ver potenciado por la presencia de SO_2 , O_3 y NO_2 .

Di et al. (2017), estimaron que el riesgo de muerte por cualquier causa aumenta en un 7.3 y 1.1 % por aumentos de $10 \mu g/m^3$ de $PM_{2.5}$ y 10 ppb de O_3 respectivamente; aunado con un modelo acoplado demostraron la prevalencia de efectos adversos ante la exposición a estos dos contaminantes aun por debajo de la normativa presente en los Estados Unidos. Jerrett et al. (2009) asoció un aumento de 10 ppb en O_3 a un incremento de 2.9% en el riesgo de muerte por enfermedades respiratorias, el cual fue de 4% en presencia de material particulado; dicho incremento en el riesgo de muerte se debe a una pérdida de la función pulmonar, desde la infancia, a lo largo de la vida de los individuos. Lim et al. (2019) encontraron que la exposición a largo plazo a O_3 se encuentra asociado a un incremento en el riesgo de muerte por múltiples causas.

Respecto a los infantes, Ma et al. (2020) obtuvieron evidencia sobre un mayor riesgo de visitas pediátricas por enfermedades respiratorias ante niveles altos de SO₂ y NO₂ respecto a los contaminantes particulados; lo cual sugiere que los individuos en edad infantil pueden ser más susceptibles a afecciones por contaminantes gaseosos que los adultos. Chen, X et al. (2022) encontró una asociación positiva entre la discapacidad visual infantil y la exposición a SO₂ y CO siendo 1.7 veces mayor el riesgo de sufrir esta afección en un incremento de 10 µg/m³ de SO₂ y 1.22 veces mayor ante un incremento en 0.1 mg/m³ de CO. Jiang et al. (2021) mediante un modelo de regresión logística multivariante demostraron que la exposición a altos niveles de CO, NO₂ y SO₂ durante el primer trimestre de gestación está asociado a al riesgo de paladar hendido y labio leporino en el feto.

El análisis realizado muestra la dosis potencial inhalada por grupo de edad, sin ser esto una medida del riesgo relativo a la salud entre cada uno de los grupos. Lo anterior se encuentra documentado en diversos estudios; Ma et al. (2020) demostraron que los infantes son más susceptibles a la exposición de gases, mientras que Amnuaylojaroen & Parasin, (2023) muestran que el riesgo en la salud por exposición a PM_{2.5} es mayor en los infantes de menor edad.

En promedio, la exposición a PM_{2.5} en las estaciones NEZ y MER fue mayor entre 7 y 9 µg/m³ por hora a lo largo del periodo de estudio respecto a la estación SFE pudiendo exceder estos valores durante algunos periodos del año al ser el promedio. Esto sugiere que la población en estas estaciones es más propensa a sufrir diabetes (Mette et al., 2023), EPOC (Schwartz et al., 1996; DeVries et al., 2017) y en general un aumento en el riesgo de muerte por diversos factores (Miller et al., 2007; Di et al., 2017).

Respecto a los gases la comparación es más compleja al ser el resultado de la suma de todos estos contaminantes, sin embargo, los resultados muestran que únicamente en la estación TLA el promedio para el SO₂ es mayor en 9 µg/m³ por

hora respecto a la estación UAX, lo cual representa un riesgo para la capacidad visual de los infantes conforme a lo descrito por Chen, X et al. (2022). Ma et al. (2020) reporta una correlación entre enfermedades respiratorias en infantes y altas concentraciones de NO₂ y SO₂, condiciones que se presentan en la estación TLA la cual puede representar un sitio de interés para la salud de los infantes.

Las mayores concentraciones de O₃ se encontraron en las estaciones CCA y UAX que a pesar de poseer niveles bajos en las concentraciones de contaminantes respecto al resto representan un riesgo a la salud según Lim et al. (2019).

Con base en lo anterior se muestra que aquellas personas expuestas a mayores niveles de contaminantes son más susceptibles a presentar diferentes síntomas y enfermedades a lo largo del tiempo que pueden desencadenar en la muerte. A pesar de las limitantes del presente estudio, es esperable que la incidencia de enfermedades asociadas a la exposición a una mala calidad del aire sea mayor en personas que consideramos como población pasiva en NEZ, MER y TLA de mantenerse la tendencia encontrada en este estudio aun cuando los niveles de contaminación para algunos contaminantes se encuentren por debajo de lo fijado por la legislación vigente.

Capítulo 7. Conclusiones

El período considerado en el presente estudio muestra que la zona centro representada por MER presentó las mayores cargas de exposición para los contaminantes gaseosos; valores altos también se presentaron en las zonas norponiente y oriente en TLA y NEZ respectivamente.

El análisis de varianza realizado reveló diferencias significativas entre los tres años de estudio para los gases, confirmando el efecto que tuvieron cada una de las medidas de confinamiento instauradas durante la Pandemia por COVID-19. Para el $PM_{2.5}$ existieron diferencias significativas entre el año 2019 y los dos años posteriores indicando una importancia del entorno local en las concentraciones reportadas para este contaminante.

Las concentraciones reportadas en cada una de las estaciones de monitoreo empleadas mostraron diferencias significativas las cuales revelan la disparidad en la exposición tanto a gases como a $PM_{2.5}$ de los habitantes de las diferentes regiones de la Ciudad de México, constituyendo un problema de salud pública principalmente en las zonas de mayor exposición.

De los contaminantes gaseosos, el NO_2 en MER, NEZ, FAC y TLA supera el valor promedio anual marcado por la NOM-023-SSA1-2021 y por las directrices de la OMS. Las concentraciones de O_3 sobrepasan los valores establecidos por la NOM-020-SSA1-2021 durante los meses de marzo a abril.

Respecto al material particulado menor a 2.5 micras, la zona oriente, NEZ, presentó los valores más altos durante los tres años de estudio seguido de la zona centro y norponiente en MER y TLA. Sin embargo, ninguna estación de monitoreo cumple con las directrices para este contaminante propuesto por la OMS ni para el valor anual de la legislación mexicana vigente.

La estación SFE, ubicada en el sur poniente de la Ciudad de México, presentó las menores cargas de exposición para ambos tipos de contaminantes (gases y partículas) durante el periodo de análisis.

A partir del análisis de los datos se concluye que la zona sur de la Ciudad de México fue la que presentó menor contaminación durante el periodo de análisis siendo esto constante durante los tres años analizados, lo que sugiere es el comportamiento típico que se presenta en la ciudad.

De manera general, las concentraciones ambientales de ambos tipos de contaminantes analizados fueron más altas durante el año 2019, año prepandemia. Para los gases, la disminución en las concentraciones ambientales fue mayor durante el año 2020 principalmente en la zona norponiente en TLA y FAC con un descenso en estas entre 15 y 20%. Para el año 2021 con la instauración de la “Nueva Normalidad” los niveles de contaminación de gases fueron similares al año 2019 teniendo un incremento mínimo en NEZ y SFE, lo cual muestra que el confinamiento tuvo un efecto positivo para los niveles de contaminación que se presentan en la ciudad.

La estación NEZ representa un sitio de interés ya que se caracterizó por presentar las cargas más elevadas para $PM_{2.5}$ y altas cargas para gases aunada a la densidad poblacional más alta de las estaciones analizadas. Esto sugiere que un gran número de personas están expuestas a una gran carga de contaminantes, lo cual puede repercutir en la salud de un mayor número de personas respecto a otras zonas de la CDMX derivada de esta exposición constante. Estos niveles parecen estar asociados a la alta densidad demográfica en la región.

Las personas masculinas mayores a 12 años son las que presentan una mayor dosis de inhalación de gases y $PM_{2.5}$ en términos de masa, sin embargo, diversos estudios reportan una mayor afectación en infantes.

La estación TLA representa un sitio de interés para la evaluación de la salud de niños por los niveles de SO_2 y NO_2 que se presentan en esta región.

Debido a que el presente estudio supone una población estática, que realiza sus actividades dentro del radio de incidencia de cada una de las estaciones analizadas, los sectores de la población que se consideran representativos de este estudio son los menores a 11 años, que son niños que por lo general realizan sus actividades escolares en la cercanía de sus casas, amas de casa y adultos mayores cuyos que permanecen la mayor parte del tiempo en las zonas aledañas a su domicilio.

7.1 Recomendaciones

La ausencia y continuidad de los datos en la mayoría de las estaciones dificulta la realización de estudios a largo plazo, del total de estaciones que conforman la red de monitoreo únicamente 7 cumplieron con 75% de los datos para todos los contaminantes durante los años 2019, 2020 y 2021 lo cual impide generar los indicadores de estado y tendencias de calidad del aire como lo estipula la NOM-136-SEMARNAT-2021. Es recomendable mantener los equipos de monitoreo en óptimo funcionamiento para la realización de estudios a largo plazo a lo largo de toda la región de monitoreo.

La instauración de medidas para la evitar la dispersión de la COVID-19 resultó en una disminución de contaminantes atmosféricos en la ciudad como se demostró también en el resto del mundo, por lo cual se recomienda la instauración del teletrabajo en la medida de lo posible.

Al estar asociados diferentes contaminantes a la misma sintomatología y/o potenciar ésta, es necesario comprender de mejor manera los efectos derivados de la exposición múltiple para el desarrollo de regulaciones que potencialmente protejan la salud de las personas.

Capítulo 8. Referencias

- Amnuaylojaroen, T., & Parasin, N. (2023). Future Health Risk Assessment of Exposure to PM_{2.5} in Different Age Groups of Children in Northern Thailand. *Toxics*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/toxics11030291>
- Aravamudan, B., Thompson, M. A., Pabelick, C. M., & Prakash, Y. S. (2013). Mitochondria in lung diseases. *Expert Review of Respiratory Medicine*, 7(6), 631–646.
- Auten, R. L., & Foster, W. M. (2011). Biochemical effects of ozone on asthma during postnatal development. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects*, 1810(11), 1114–1119. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2011.01.008>
- Bell, M. L., O'Neill, M. S., Ranjit, N., Borja-Aburto, V. H., Cifuentes, L. A., & Gouveia, N. C. (2008). Vulnerability to heat-related mortality in Latin America: a case-crossover study in São Paulo, Brazil, Santiago, Chile and Mexico City, Mexico. *International Journal of Epidemiology*, 37(4), 796–804. <https://doi.org/10.1093/ije/dyn094>
- Biswas, S. K., & Rahman, I. (2009). Environmental toxicity, redox signaling and lung inflammation: the role of glutathione. *Molecular Aspects of Medicine*, 30(1–2), 60–76.
- Braniš, M. (2010). Personal exposure measurements. In *Human exposure to pollutants via dermal absorption and inhalation* (pp. 97–141). Springer.
- Chen, L., Wei, J., Ma, T., Gao, D., Wang, X., Wen, B., Chen, M., Li, Y., Jiang, J., Wu, L., Li, W., Liu, X., Song, Y., Guo, X., Dong, Y., & Ma, J. (2022). Ambient gaseous pollutant exposure and incidence of visual impairment among children and adolescents: findings from a longitudinal, two-center cohort study in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(48), 73262–73270. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20025-3>
- Chen, X., Luan, M., Liu, J., Yao, Y., Li, X., Wang, T., Zhang, H., Han, Y., Lu, X., Chen, W., Hu, X., Zheng, M., Qiu, X., & Zhu, T. (2022). Risk factors in air pollution exposome contributing to higher levels of TNF α in COPD patients.

- Environment International*, 159, 107034.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.107034>
- Comisión ambiental de la Megalópolis (2018). (31 de enero de 2018).
Recomendaciones para la temporada de ozono. Gobierno de México.
<https://www.gob.mx/comisionambiental/articulos/recomendaciones-para-la-temporada-de-ozono?idiom=es>
- Comisión ambiental de la Megalópolis (2019). (14 de mayo de 2019). Se activa Contingencia Ambiental Atmosférica extraordinaria por partículas (PM2.5) y ozono en la ZMVM. Gobierno de México.
<https://www.gob.mx/comisionambiental/prensa/se-activa-contingencia-ambiental-atmosferica-extraordinaria-por-particulas-pm2-5-y-ozono-en-la-zmvm>
- DeVries, R., Kriebel, D., & Sama, S. (2017). Outdoor Air Pollution and COPD-Related Emergency Department Visits, Hospital Admissions, and Mortality: A Meta-Analysis. *COPD: Journal of Chronic Obstructive Pulmonary Disease*, 14(1), 113–121. <https://doi.org/10.1080/15412555.2016.1216956>
- Di, Q., Wang, Y., Zanobetti, A., Wang, Y., Koutrakis, P., Choirat, C., Dominici, F., & Schwartz, J. D. (2017). Air Pollution and Mortality in the Medicare Population. *New England Journal of Medicine*, 376(26), 2513–2522.
<https://doi.org/10.1056/NEJMoa1702747>
- Dominici, F., Sheppard, L., & Clyde, M. (2003). Health Effects of Air Pollution: A Statistical Review. *International Statistical Review*, 71(2), 243–276.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1751-5823.2003.tb00195.x>
- EPA. Exposure Factors Handbook 2011 Edition (Final Report). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-09/052F, 2011.
- Environmental Protection Agency (2022). <https://www.epa.gov/report-environment/outdoor-air-quality>
- Ernesto, A.-M., Leticia, M., Claudia, G.-C., C, B. J., Clifford, M. J., Irma, R., León, R. S. P. de, & R, O.-V. A. (2002). Biologic effects induced in vitro by PM10 from three different zones of Mexico City. *Environmental Health Perspectives*, 110(7), 715–720. <https://doi.org/10.1289/ehp.02110715>

- Farman, C., Watkins, K., Hoozen, B., Last, J., Witschi, H., & Pinkerton, K. (1999). Centriacinar Remodeling and Sustained Procollagen Gene Expression after Exposure to Ozone and Nitrogen Dioxide. *American Journal of Respiratory Cell and Molecular Biology*, 20, 303–311.
<https://doi.org/10.1165/ajrcmb.20.2.3269>
- Gracia-Cazaña, T., González, S., Parrado, C., Juarranz, Á., & Gilaberte, Y. (2020). La influencia del exposoma en el cáncer de piel. *Actas Dermo-Sifiliográficas*, 111(6), 460–470. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ad.2020.04.008>
- Harkema, J. R., & Wagner, J. G. (2005). Epithelial and inflammatory responses in the airways of laboratory rats coexposed to ozone and biogenic substances: Enhancement of toxicant-induced airway injury. *Experimental and Toxicologic Pathology*, 57, 129–141.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.etp.2005.05.013>
- Huangfu, P., & Atkinson, R. (2020). Long-term exposure to NO₂ and O₃ and all-cause and respiratory mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*, 144, 105998.
- Jang An Soo Choi In Seon, K. S. W. S. B. C. Y. C. H. J. J. Y. (2003). Airway Obstruction after Acute Ozone Exposure in BALB/c Mice Using Barometric Plethysmography. *Korean J Intern Med*, 18(1), 1–5.
<https://doi.org/10.3904/kjim.2003.18.1.1>
- Jerrett, M., Burnett, R. T., Pope, C. A., Ito, K., Thurston, G., Krewski, D., Shi, Y., Calle, E., & Thun, M. (2009). Long-Term Ozone Exposure and Mortality. *New England Journal of Medicine*, 360(11), 1085–1095.
<https://doi.org/10.1056/NEJMoa0803894>
- Jiang, W., Xie, W., Ni, B., Zhou, H., Liu, Z., & Li, X. (2021). First trimester exposure to ambient gaseous air pollutants and risk of orofacial clefts: a case–control study in Changsha, China. *BMC Oral Health*, 21(1), 530.
<https://doi.org/10.1186/s12903-021-01876-7>
- Katsouyanni, K. (2003). Ambient air pollution and health. *British Medical Bulletin*, 68(1), 143–156. <https://doi.org/10.1093/bmb/ldg028>
- Kelishadi, R., & Poursafa, P. (2010). Review paper Air pollution and non-respiratory

- health hazards for children. *Archives of Medical Science*, 6(4), 483–495.
<https://doi.org/10.5114/aoms.2010.14458>
- Khatri, S. B., & Pennington, E. J. (2022). *Lung Health and the Exposome*.
- Kim, K.-H., Jahan, S. A., & Kabir, E. (2013). A review on human health perspective of air pollution with respect to allergies and asthma. *Environment International*, 59, 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.05.007>
- Liu, F., Chen, G., Huo, W., Wang, C., Liu, S., Li, N., Mao, S., Hou, Y., Lu, Y., & Xiang, H. (2019). Associations between long-term exposure to ambient air pollution and risk of type 2 diabetes mellitus: A systematic review and meta-analysis. *Environmental Pollution*, 252, 1235–1245.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.06.033>
- Ma, Y., Yue, L., Liu, J., He, X., Li, L., Niu, J., & Luo, B. (2020). Association of air pollution with outpatient visits for respiratory diseases of children in an ex-heavily polluted Northwestern city, China. *BMC Public Health*, 20(1), 816.
<https://doi.org/10.1186/s12889-020-08933-w>
- Mack, S. M., Madl, A. K., & Pinkerton, K. E. (2019). Respiratory Health Effects of Exposure to Ambient Particulate Matter and Bioaerosols. In *Comprehensive Physiology* (pp. 1–20). <https://doi.org/10.1002/cphy.c180040>
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Frontiers in Public Health*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>
- Matthews, N. C., Pfeffer, P. E., Mann, E. H., Kelly, F. J., Corrigan, C. J., Hawrylowicz, C. M., & Lee, T. H. (2015). Urban Particulate Matter–Activated Human Dendritic Cells Induce the Expansion of Potent Inflammatory Th1, Th2, and Th17 Effector Cells. *American Journal of Respiratory Cell and Molecular Biology*, 54(2), 250–262. <https://doi.org/10.1165/rcmb.2015-0084OC>
- Mette, S., Harbo, P. A., Arthur, H. U., H., C. J., Jørgen, B., Marie, F. L., Matthias, K., Christopher, A., H., V. V., Funch, L. C., & Ole, R.-N. (2023). Effects of Sociodemographic Characteristics, Comorbidity, and Coexposures on the Association between Air Pollution and Type 2 Diabetes: A Nationwide Cohort Study. *Environmental Health Perspectives*, 131(2), 27008.

<https://doi.org/10.1289/EHP11347>

- Miller, K. A., Siscovick, D. S., Sheppard, L., Shepherd, K., Sullivan, J. H., Anderson, G. L., & Kaufman, J. D. (2007). Long-Term Exposure to Air Pollution and Incidence of Cardiovascular Events in Women. *New England Journal of Medicine*, *356*(5), 447–458. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa054409>
- Molina, L. T., Madronich, S., Gaffney, J. S., Apel, E., de Foy, B., Fast, J., Ferrare, R., Herndon, S., Jimenez, J. L., Lamb, B., Osornio-Vargas, A. R., Russell, P., Schauer, J. J., Stevens, P. S., Volkamer, R., & Zavala, M. (2010). An overview of the MILAGRO 2006 Campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *10*(18), 8697–8760. <https://doi.org/10.5194/acp-10-8697-2010>
- Motesaddi Zarandi, S., Shahsavani, A., Khodagholi, F., & Fakhri, Y. (2021). Co-exposure to ambient PM_{2.5} plus gaseous pollutants increases amyloid β _{1–42} accumulation in the hippocampus of male and female rats. *Toxin Reviews*, *40*(3), 300–309. <https://doi.org/10.1080/15569543.2019.1611604>
- Mumby, S., Chung, K. F., & Adcock, I. (2019). Transcriptional Effects of Ozone and Impact on Airway Inflammation. *Frontiers in Immunology*, *10*. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2019.01610>
- Pan American Health Organization (2018). <https://www.paho.org/en/topics/air-quality-and-health/ambient-and-household-air-pollution-and-health-frequently-asked>
- Petkus, A., Resnick, S., Wang, X., Beavers, D., Espeland, M., Gatz, M., Gruenewald, T., Millstein, J., Chui, H., Kaufman, J., Manson, J., Wellenius, G., Whitsel, E., Widaman, K., Younan, D., & Chen, J.-C. (2022). Ambient air pollution exposure and increasing depressive symptoms in older women: The mediating role of the prefrontal cortex and insula. *Science of The Total Environment*, *823*, 153642. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153642>
- Rahman, I., & MacNee, W. (2000). Oxidative stress and regulation of glutathione in lung inflammation. *European Respiratory Journal*, *16*(3), 534–554. <https://doi.org/https://doi.org/10.1034/j.1399-3003.2000.016003534.x>
- Rojas-Martinez, R., Perez-Padilla, R., Olai-Fernandez, G., Mendoza-Alvarado, L.,

- Moreno-Macias, H., Fortoul, T., McDonnell, W., Loomis, D., & Romieu, I. (2007). Lung Function Growth in Children with Long-Term Exposure to Air Pollutants in Mexico City. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 176(4), 377–384. <https://doi.org/10.1164/rccm.200510-1678OC>
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. 2021. Caracterización, evaluación y análisis del entorno físico y de la representatividad en las estaciones del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire.
- Scholz, S., Nichols, J. W., Escher, B. I., Ankley, G. T., Altenburger, R., Blackwell, B., Brack, W., Burkhard, L., Collette, T. W., Doering, J. A., Ekman, D., Fay, K., Fischer, F., Hackermüller, J., Hoffman, J. C., Lai, C., Leuthold, D., Martinovic-Weigelt, D., Reemtsma, T., ... von Bergen, M. (2022). The Eco-Exposome Concept: Supporting an Integrated Assessment of Mixtures of Environmental Chemicals. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 41(1), 30–45. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/etc.5242>
- Schwartz, J., Dockery, D. W., & Neas, L. M. (1996). Is daily mortality associated specifically with fine particles?. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 46(10), 927-939.
- Shields, K. N., Cavallari, J. M., Hunt, M. J. O., Lazo, M., Molina, M., Molina, L., & Holguin, F. (2013). Traffic-related air pollution exposures and changes in heart rate variability in Mexico City: A panel study. *Environmental Health*, 12(1), 7. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-12-7>
- So, R., Andersen, Z. J., Chen, J., Stafoggia, M., de Hoogh, K., Katsouyanni, K., Vienneau, D., Rodopoulou, S., Samoli, E., Lim, Y.-H., Jørgensen, J. T., Amini, H., Cole-Hunter, T., Mahmood Taghavi Shahri, S., Maric, M., Bergmann, M., Liu, S., Azam, S., Loft, S., ... Mehta, A. J. (2022). Long-term exposure to air pollution and mortality in a Danish nationwide administrative cohort study: Beyond mortality from cardiopulmonary disease and lung cancer. *Environment International*, 164, 107241. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107241>

- Soleti, R., Porro, C., & Martínez, M. C. (2013). Apoptotic process in cystic fibrosis cells. *Apoptosis*, 18(9), 1029–1038.
- Steinle, S., Reis, S., & Sabel, C. E. (2011). Assessment of personal exposure to air pollutants in Scotland—an integrated approach using personal monitoring data. *MODSIM*.
- Takebayashi, T., Taguri, M., Odajima, H., Hasegawa, S., Asakura, K., Milojevic, A., Takeuchi, A., Konno, S., Morikawa, M., & Tsukahara, T. (2022). Exposure to PM2.5 and lung function growth in pre-and early-adolescent schoolchildren: a longitudinal study involving repeated lung function measurements in Japan. *Annals of the American Thoracic Society*, 19(5), 763–772.
- Tang, S., Li, T., Fang, J., Chen, R., Cha, Y., Wang, Y., Zhu, M., Zhang, Y., Chen, Y., Du, Y., Yu, T., Thompson, D. C., Godri Pollitt, K. J., Vasiliou, V., Ji, J. S., Kan, H., Zhang, J. J., & Shi, X. (2021). The exposome in practice: an exploratory panel study of biomarkers of air pollutant exposure in Chinese people aged 60–69 years (China BAPE Study). *Environment International*, 157, 106866. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106866>
- Vicente-Herrero, M. Â. T., de la Torre, M. Â. V., Capdevila GarcÃ-a, L. M., Terradillos GarcÃ-a, M. Â. J., LÃ-textthreesuperiorpez-GonzÃ-lez, Ã. A., Aguilar Jimenez, E., & Reinoso Barbero, L. (2016). Exposoma: un nuevo concepto en Salud Laboral y Salud PÃ-textordmasculineblica. *Revista de La AsociaciÃ-textthreesuperiorn EspaÃ\pmola de Especialistas En Medicina Del Trabajo*, 25, 176–183.
http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1132-62552016000300008&nrm=iso
- Vincent, K. Stedman, J. (2013). A review of air quality station type classifications for UK compliance monitorin. Ricardo-AEA https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/cat13/1309250915_130923_Review_of_air_quality_monitoring_station_classifications.pdf
- Vineis, P. (2019). What Is the Exposome and How It Can Help Research on Air Pollution. *Emission Control Science and Technology*, 5(1), 31–36.
<https://doi.org/10.1007/s40825-018-0104-8>

- Wang, J., Wang, W., Zhang, W., Wang, J., Huang, Y., Hu, Z., Chen, Y., Guo, X., Deng, F., & Zhang, L. (2022). Co-exposure to multiple air pollutants and sleep disordered breathing in patients with or without obstructive sleep apnea: A cross-sectional study. *Environmental Research*, 212, 113155.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113155>
- WHO (World Health Organization), (2018). Air pollution and child health: prescribing clean air. WHO/CED/PHE/18.01.
<https://www.who.int/ceh/publications/air-pollution-child-health/en/>
- WHO (World Health Organization), (2021). WHO global air quality guidelines.
<https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf>
- World Health Organization, WHO, (2021). Ambient Air Pollution,
[https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- World Health Organization, WHO, (2021). Global air quality guidelines, particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva.
- World Health Organization, WHO, (2021). Ambient (outdoor) air pollution,
[https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- WHO (World Health Organization), (2022). Air pollution.
https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1
- Wu, J.-Z., Ge, D.-D., Zhou, L.-F., Hou, L.-Y., Zhou, Y., & Li, Q.-Y. (2018). Effects of particulate matter on allergic respiratory diseases. *Chronic Diseases and Translational Medicine*, 4(2), 95–102.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cdtm.2018.04.001>
- Yan, T., Wang, W., Xia, J., Jia, J., Xu, J., Dan, M., Zhou, S., Niu, P., Gong, S., Chen, Z., Bai, Y., Chen, T., & Jia, G. (2022). Exposure to the real ambient air pollutants alters the composition of nasal mucosa bacteria in the rat model. *Chemosphere*, 287, 132269.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132269>
- Yitshak Sade, M., Shi, L., Colicino, E., Amini, H., Schwartz, J. D., Di, Q., & Wright,

R. O. (2023). Long-term air pollution exposure and diabetes risk in American older adults: A national secondary data-based cohort study. *Environmental Pollution*, 320, 121056.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121056>

Zhang, Yingying, Ji, X., Ku, T., & Sang, N. (2015). Inflammatory response and endothelial dysfunction in the hearts of mice co-exposed to SO₂, NO₂, and PM_{2.5}. *Environmental Toxicology*, 31, n/a-n/a.

<https://doi.org/10.1002/tox.22200>

Zhang, Yu, Mustieles, V., Williams, P. L., Wylie, B. J., Souter, I., Calafat, A. M., Demokritou, M., Lee, A., Vagios, S., Hauser, R., & Messerlian, C. (2021). Parental preconception exposure to phenol and phthalate mixtures and the risk of preterm birth. *Environment International*, 151, 106440.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106440>

Capítulo 9. Anexos

Anexo A. Perfiles diarios CCA

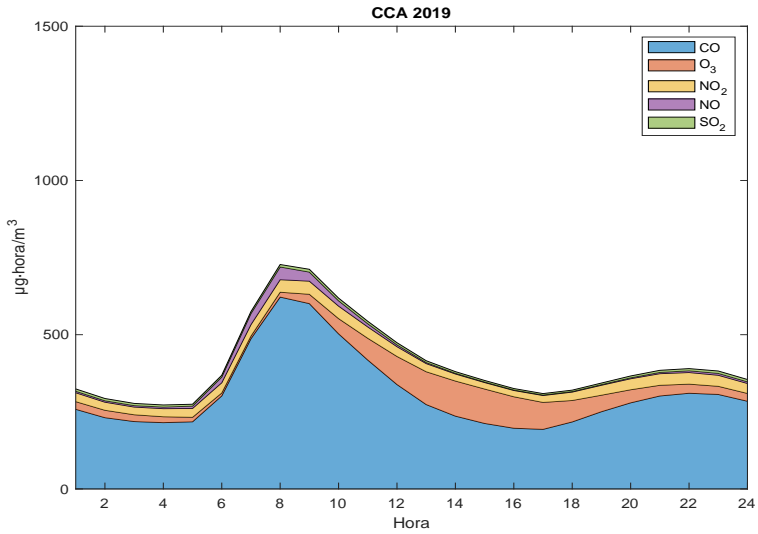


Figura 39. Perfil de exposición ambiental diaria a gases CCA 2019.

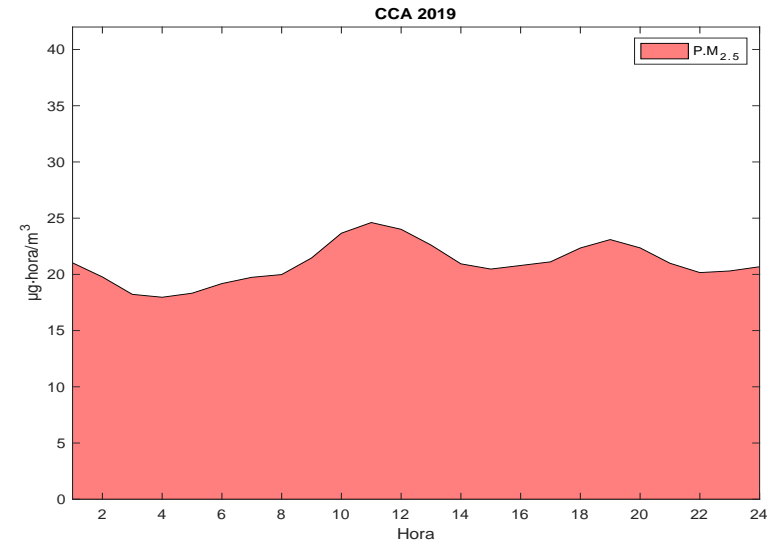


Figura 41. Perfil de exposición ambiental diaria a PM_{2.5} CCA 2019.

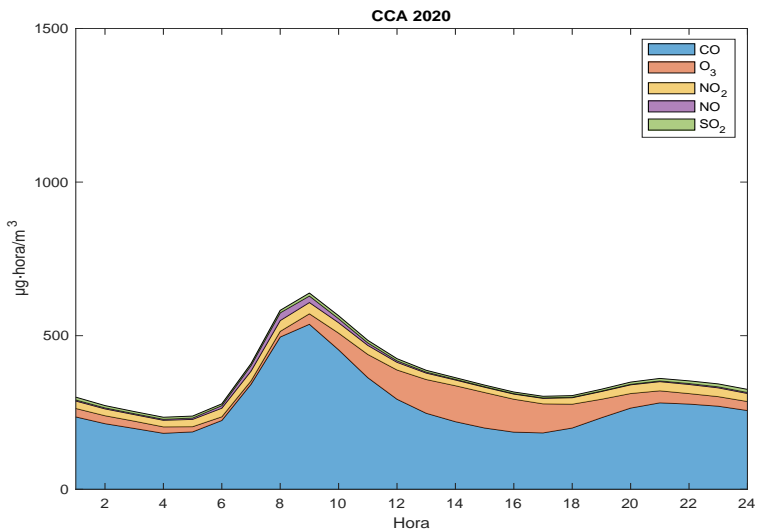


Figura 40. Perfil de exposición ambiental diaria a gases CCA 2020.

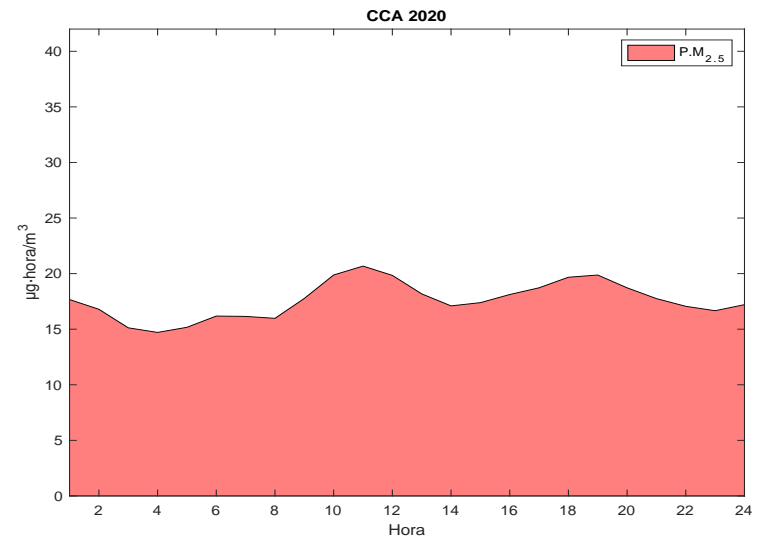


Figura 42. Perfil de exposición ambiental diaria a PM_{2.5} CCA 2020.

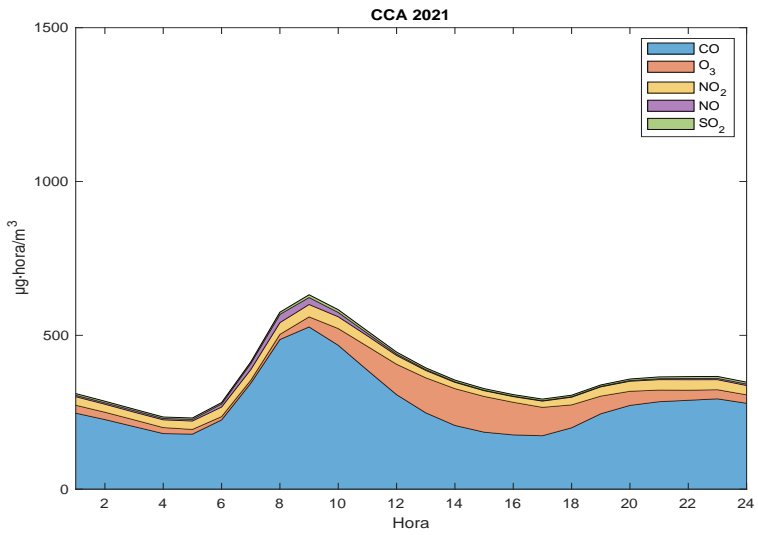


Figura 43. Perfil de exposición ambiental diaria a gases CCA 2021.

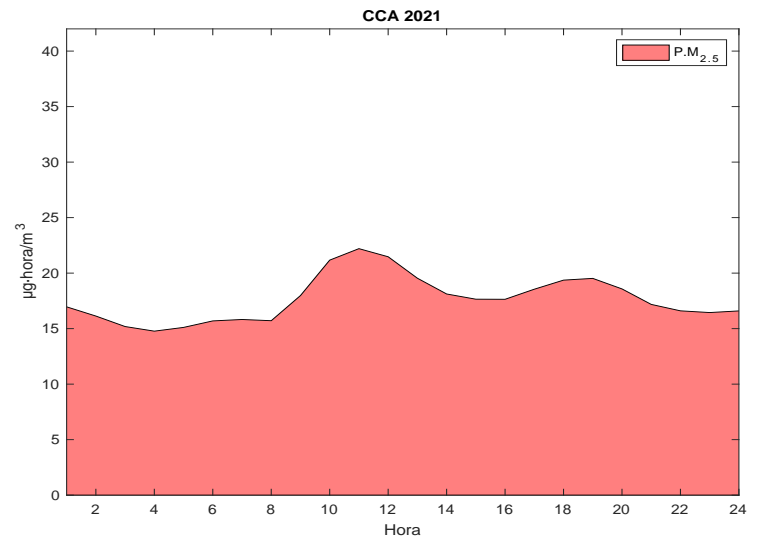


Figura 45. Perfil de exposición ambiental diaria a PM_{2.5} CCA 2021.

Merced

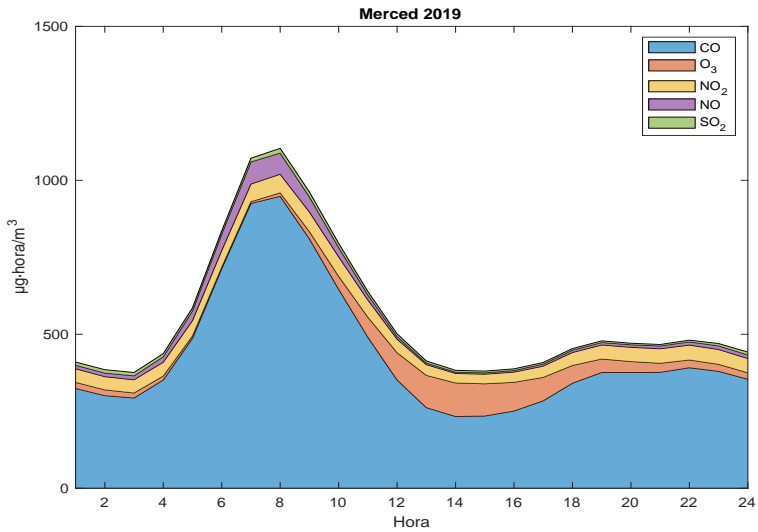


Figura 44. Perfil de exposición ambiental diaria a gases MER 2019.

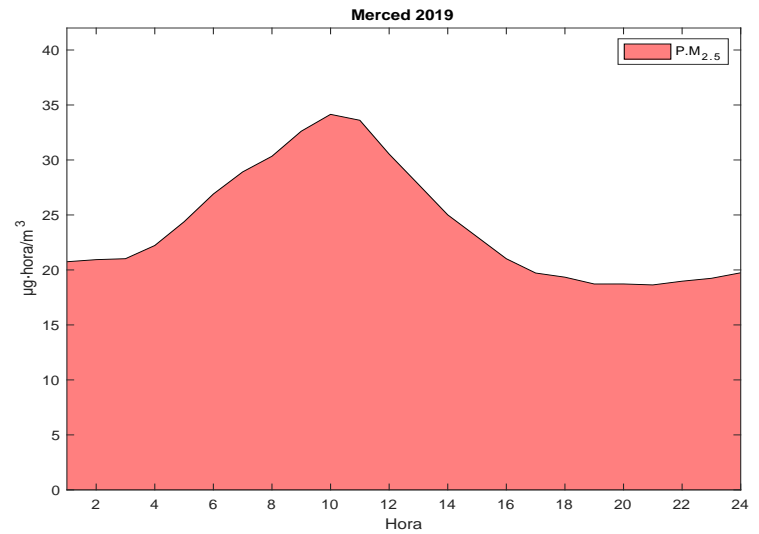


Figura 46. Perfil de exposición ambiental diaria a PM_{2.5} MER 2019.

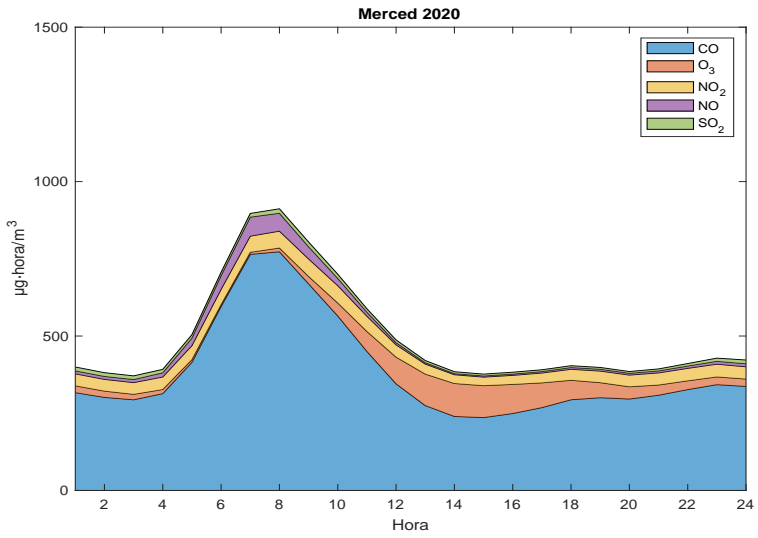


Figura 47. Perfil de exposición ambiental diaria a gases MER 2020.

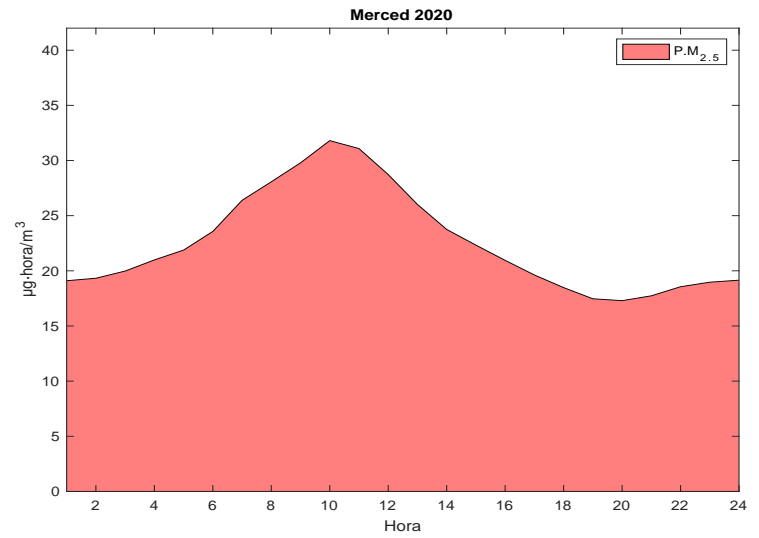


Figura 49. Perfil de exposición ambiental diaria a PM_{2.5} MER 2020.

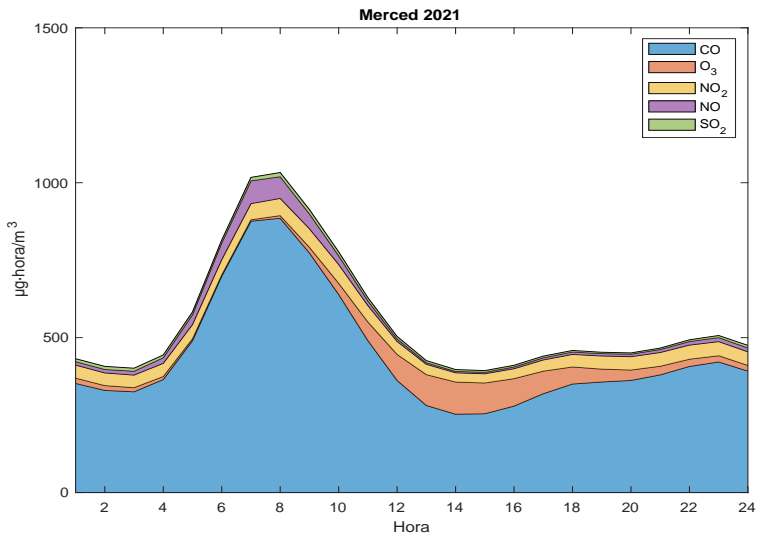


Figura 48. Perfil de exposición ambiental diaria a gases MER 2021.

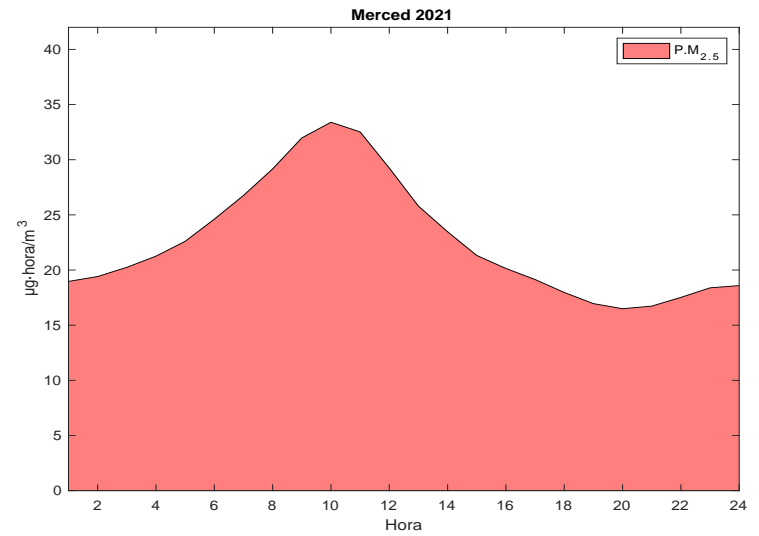


Figura 50. Perfil de exposición ambiental diaria a PM_{2.5} MER 2021.

Nezahualc6yotl

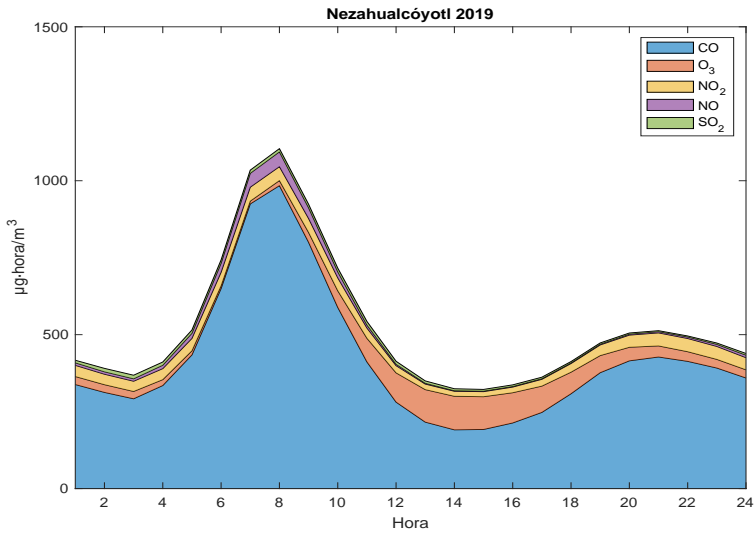


Figura 51. Perfil de exposici6n ambiental diaria a gases NEZ 2019.

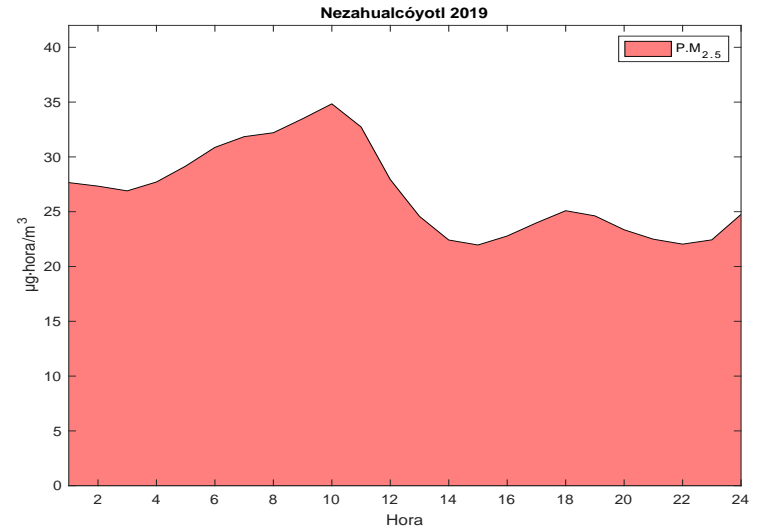


Figura 53. Perfil de exposici6n ambiental diaria a PM_{2.5} NEZ 2019.

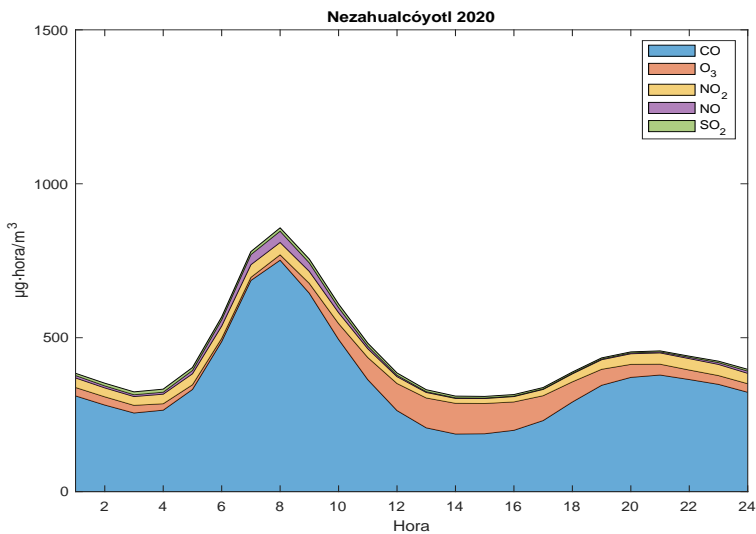


Figura 52. Perfil de exposici6n ambiental diaria a gases NEZ 2020.

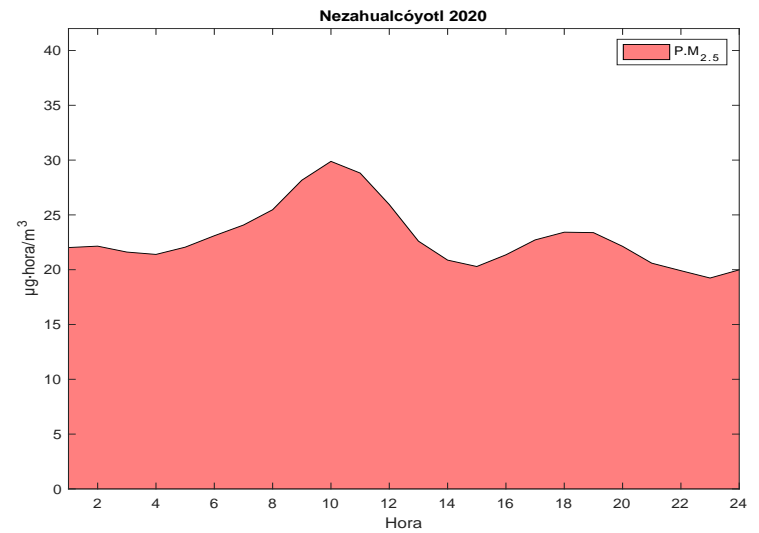


Figura 54. Perfil de exposici6n ambiental diaria a PM_{2.5} NEZ 2020

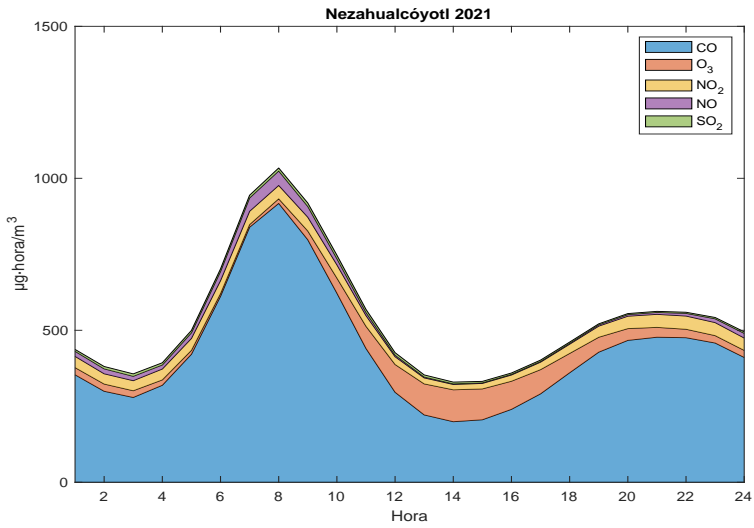


Figura 55. Perfil de exposición ambiental diaria a gases NEZ 2021.

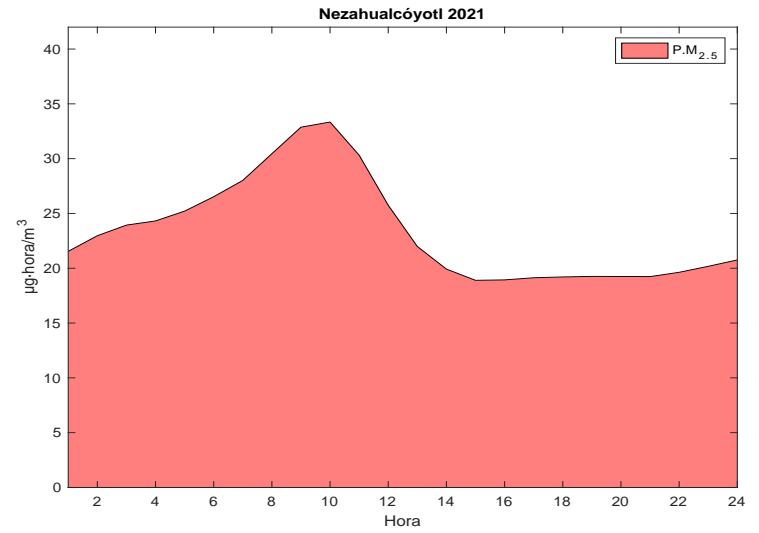


Figura 57. Perfil de exposición ambiental diaria a PM_{2.5} NEZ 2021.

Santa Fe

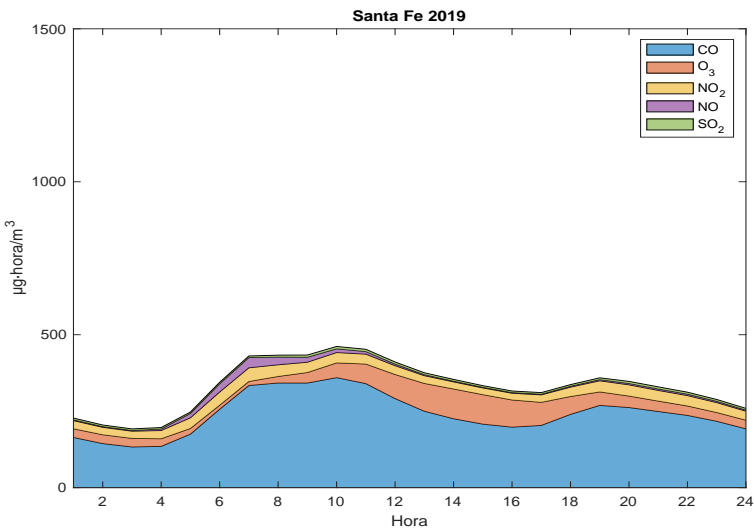


Figura 56. Perfil de exposición ambiental diaria a gases SFE 2019.

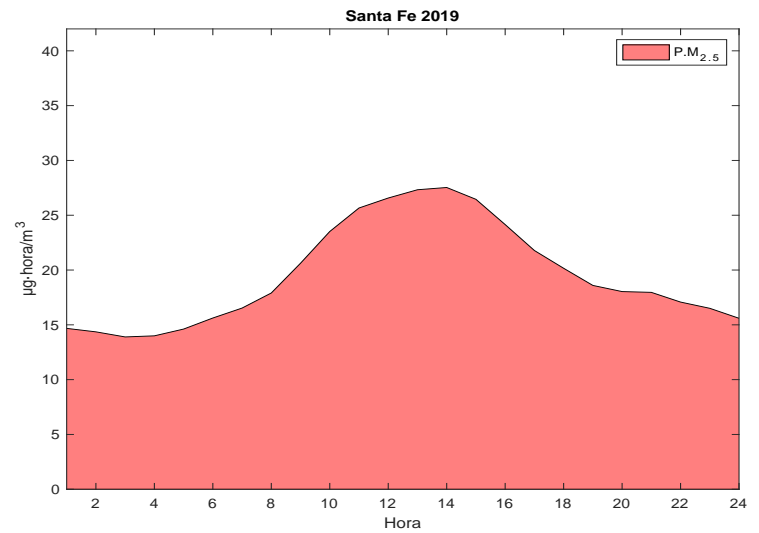


Figura 58. Perfil de exposición ambiental diaria a PM_{2.5} NEZ 2021.

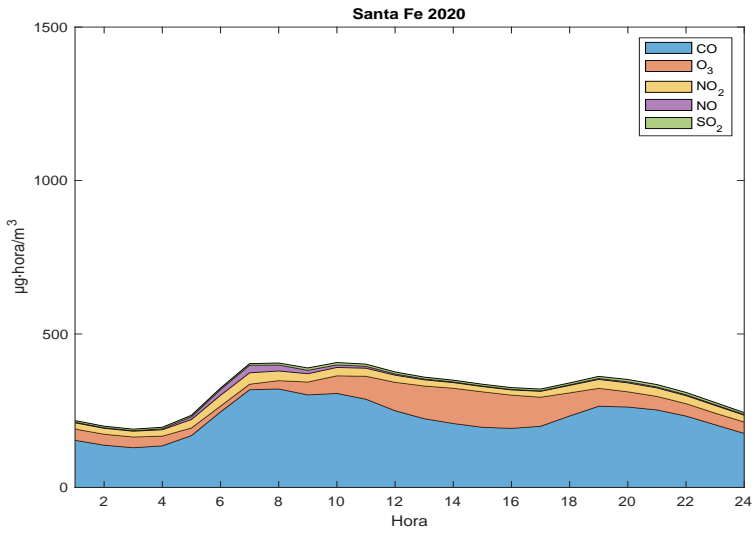


Figura 59. Perfil de exposición ambiental diaria a gases SFE 2020.

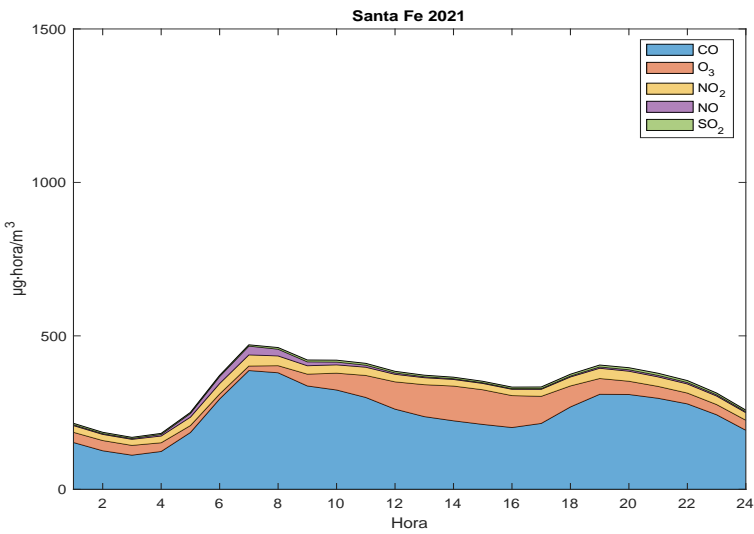


Figura 60. Perfil de exposición ambiental diaria a gases SFE 2021

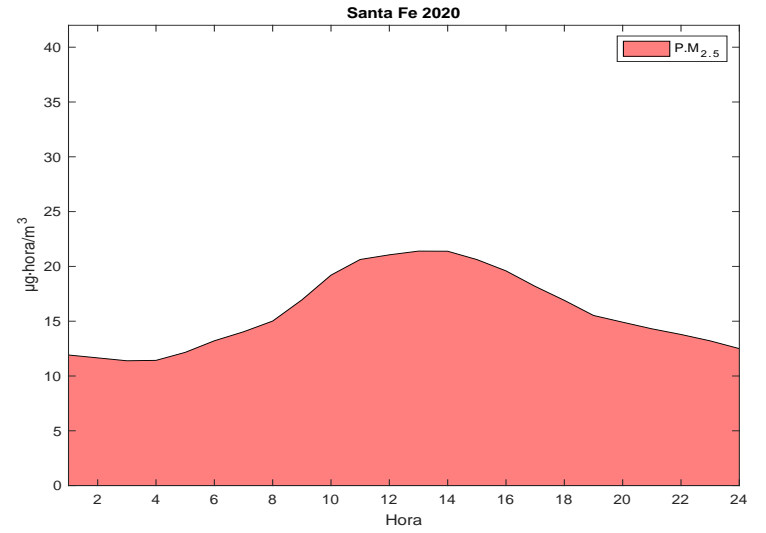


Figura 61. Perfil de exposición ambiental diaria a PM_{2.5} SFE 2020.

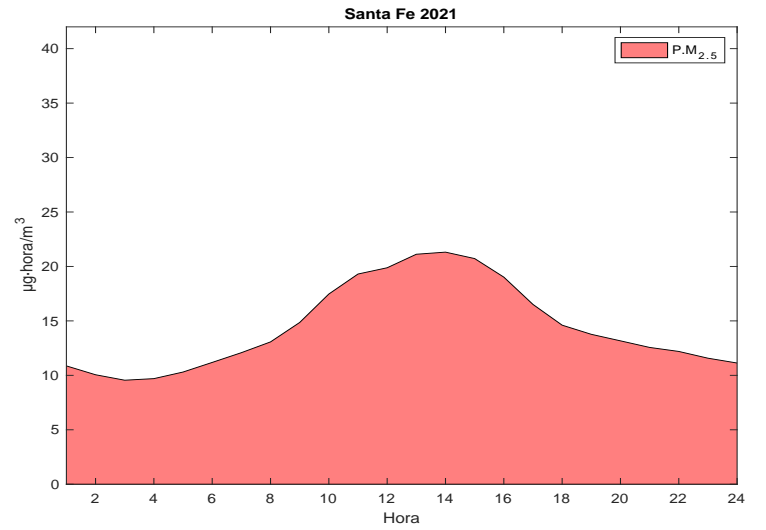


Figura 62. Perfil de exposición ambiental diaria a PM_{2.5} SFE 2021.

Tlalnepantla

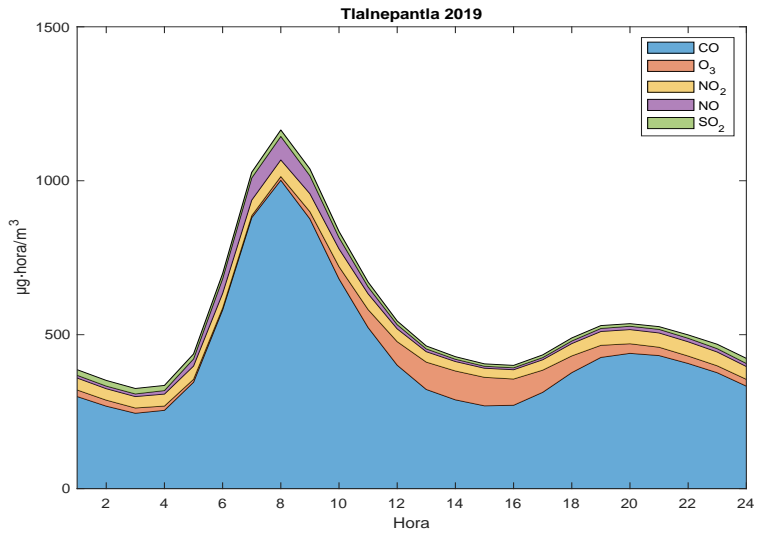


Figura 63. Perfil de exposición ambiental diaria a gases TLA 2019.

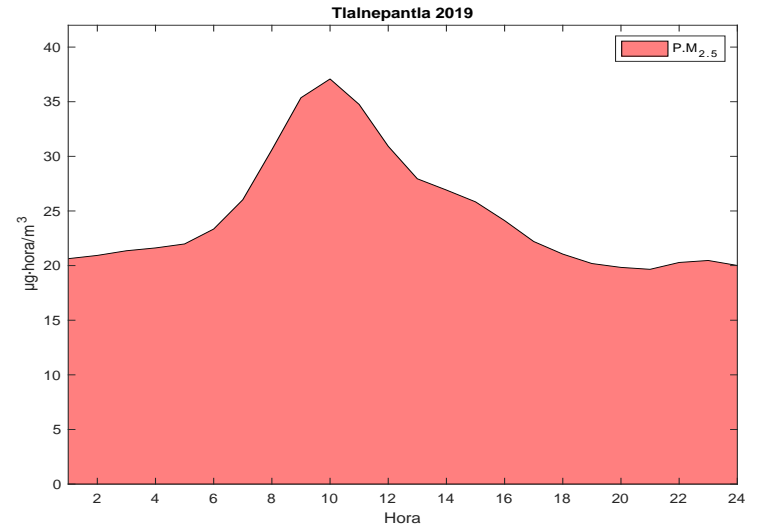


Figura 65. Perfil de exposición ambiental diaria a PM_{2.5} TLA 2019.

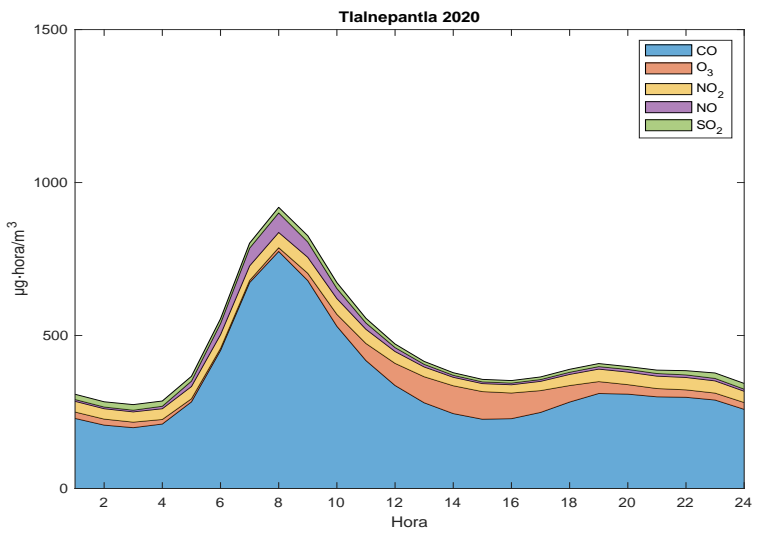


Figura 64. Perfil de exposición ambiental diaria a gases TLA 2020.

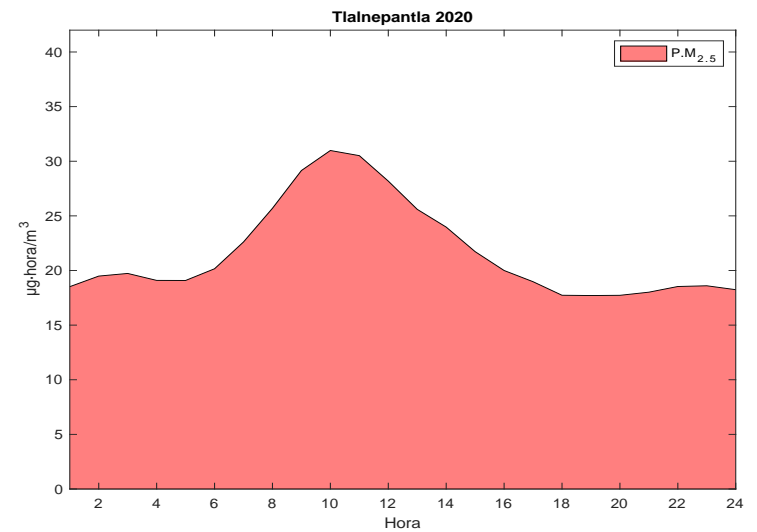


Figura 66. Perfil de exposición ambiental diaria a PM_{2.5} TLA 2020.

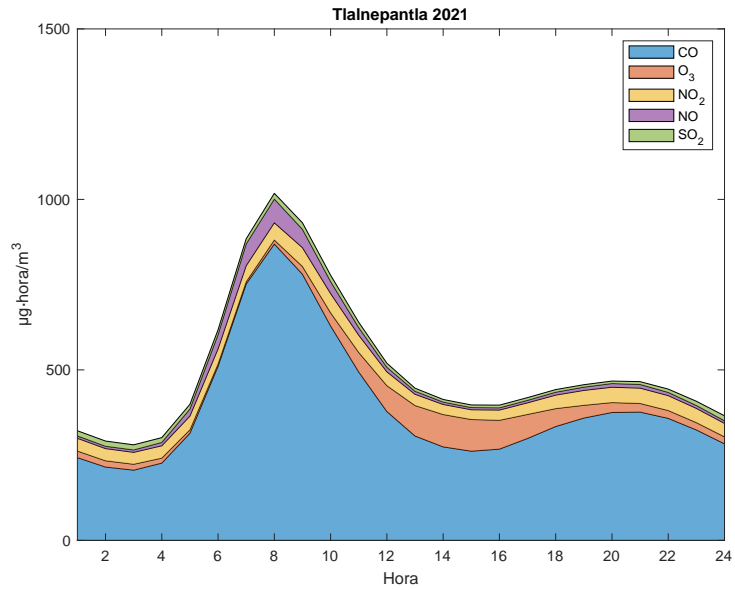


Figura 67. Perfil de exposición ambiental diaria a gases TLA 2021

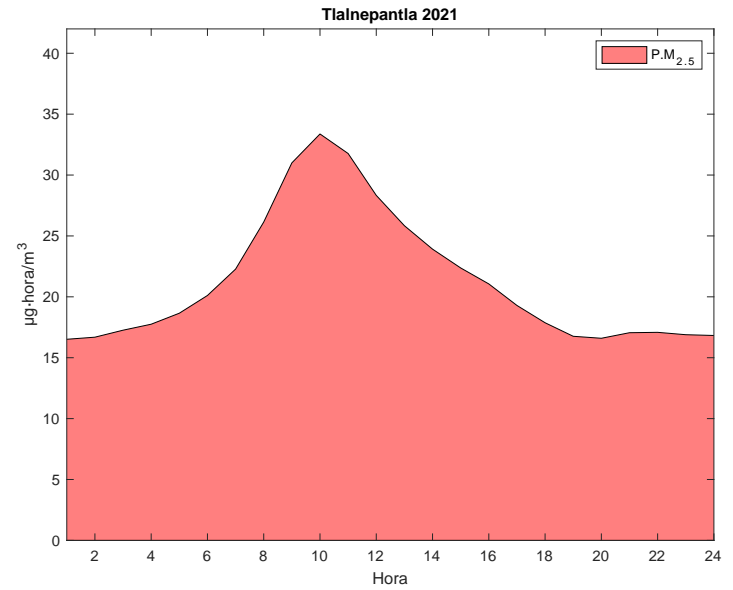


Figura 69. Perfil de exposición ambiental diaria a PM_{2.5} TLA 2021.

UAM Xochimilco

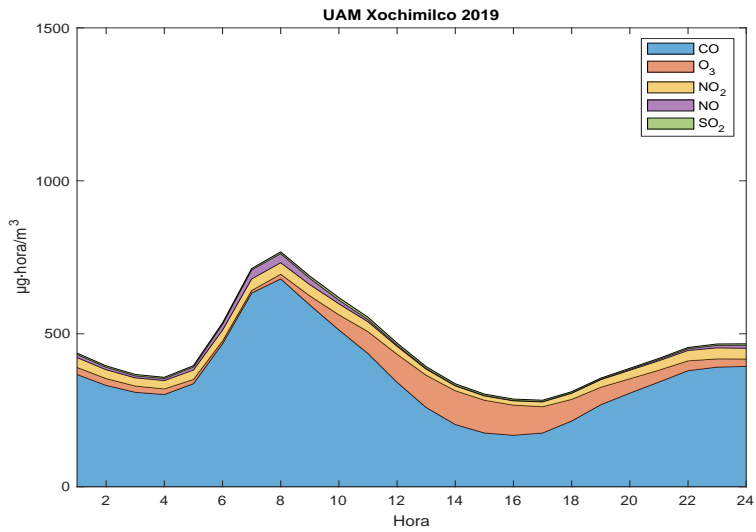


Figura 68. Perfil de exposición ambiental diaria a gases UAX 2019.

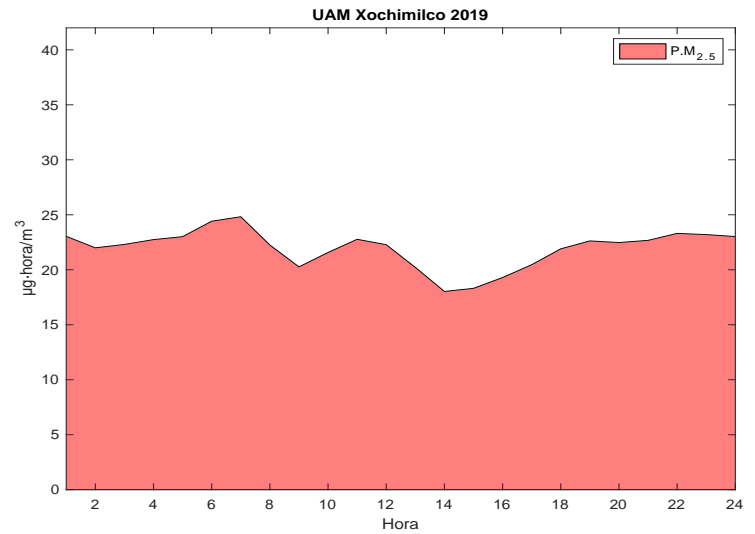


Figura 70. Perfil de exposición ambiental diaria a PM_{2.5} UAX 2019.

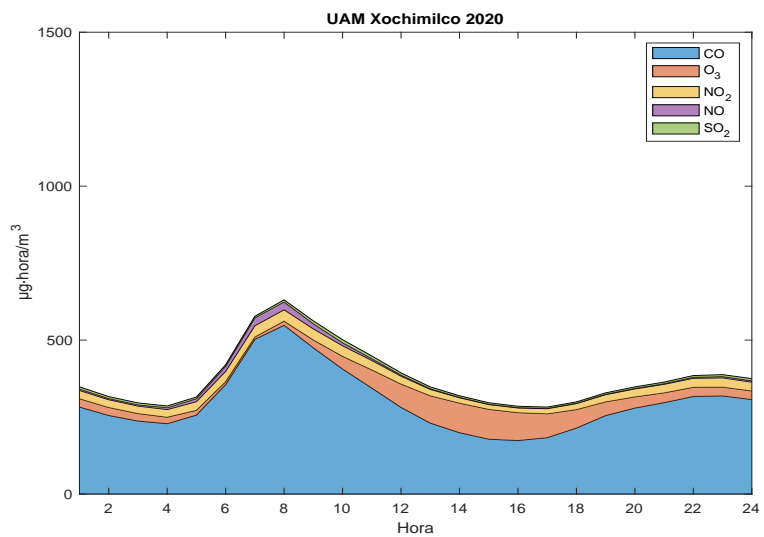


Figura 71. Perfil de exposición ambiental diaria a gases UAX 2020.

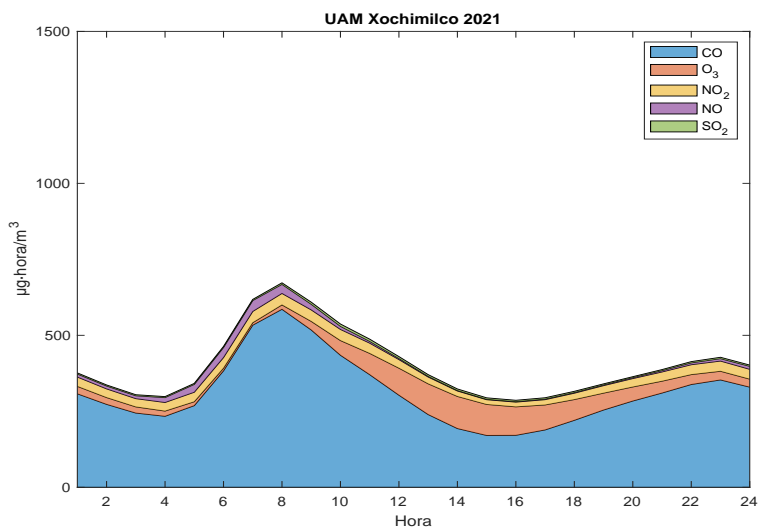


Figura 72. Perfil de exposición ambiental diaria a gases UAX 2021.

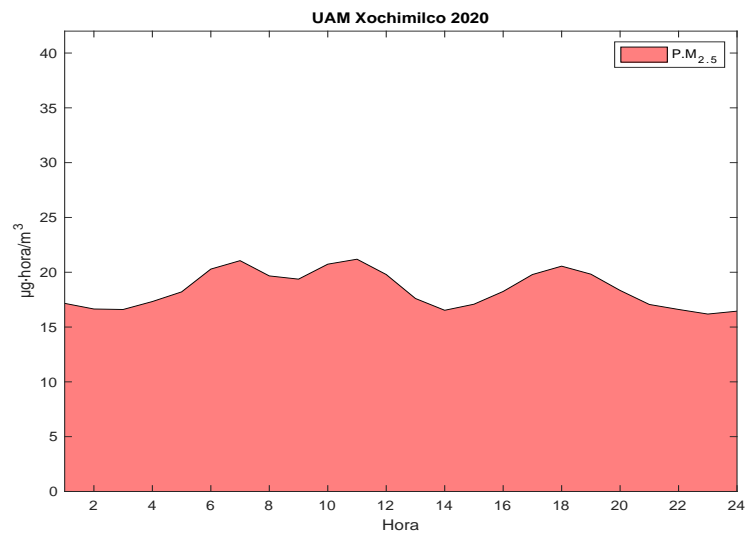


Figura 73. Perfil de exposición ambiental diaria a PM_{2.5} UAX 2021.

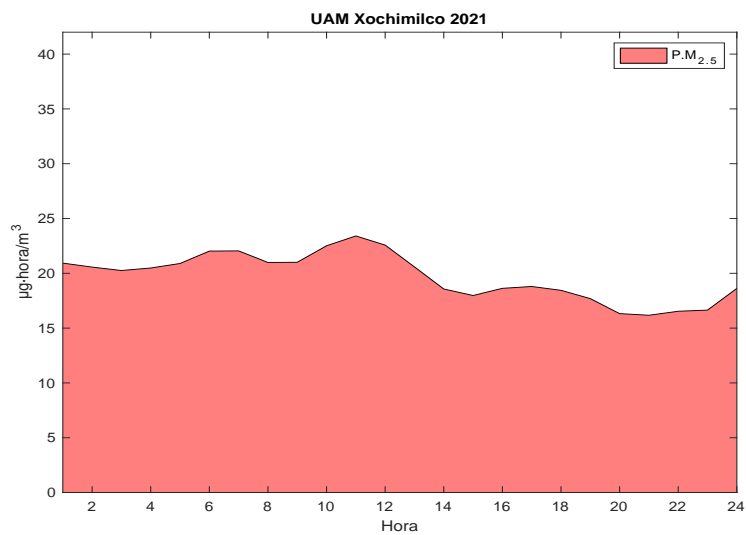


Figura 74. Perfil de exposición ambiental diaria a PM_{2.5} UAX 2021.

FES Acatlán

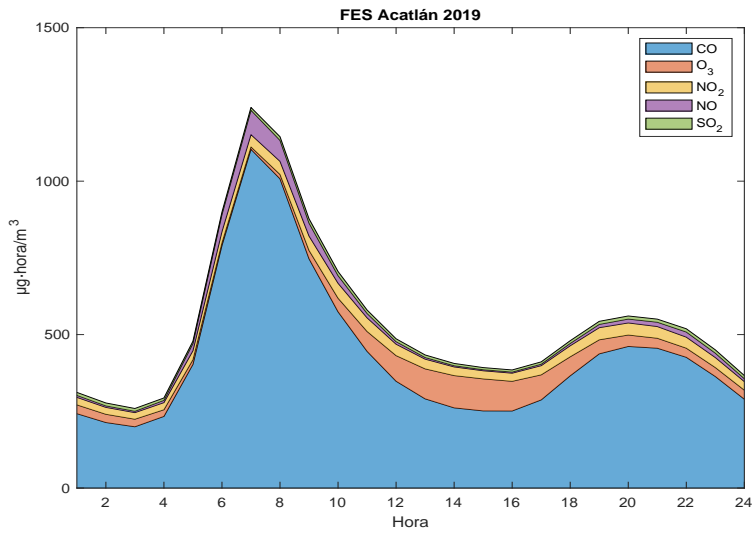


Figura 75. Perfil de exposición ambiental diaria a gases FAC 2019.

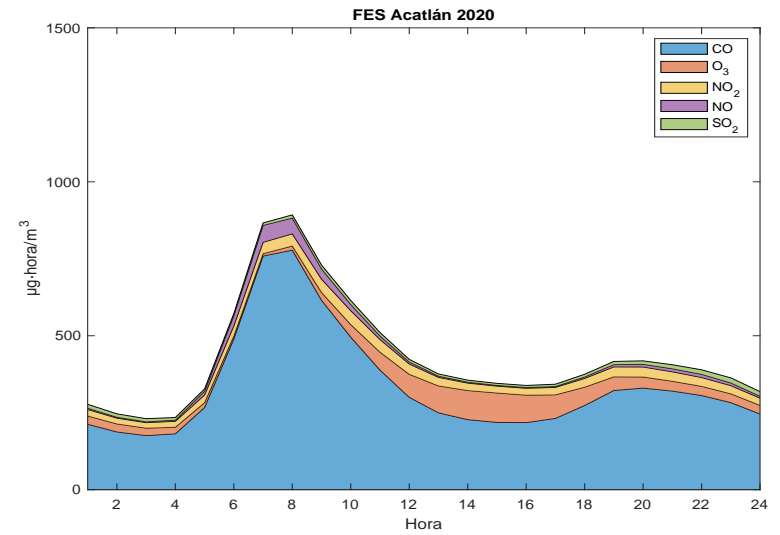


Figura 77. Perfil de exposición ambiental diaria a gases FAC 2020.

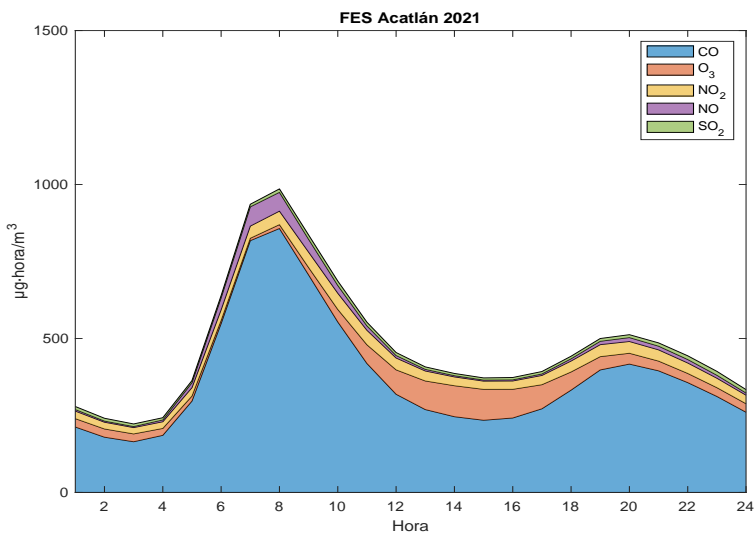


Figura 76. Perfil de exposición ambiental diaria a gases FAC 2021.

Anexo B. Perfiles anuales

CCA

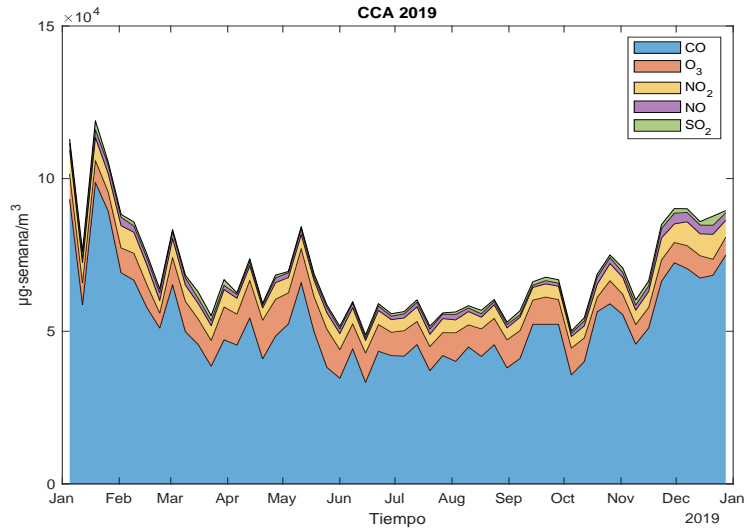


Figura 78. Perfil de exposición ambiental anual a gases CCA 2019.

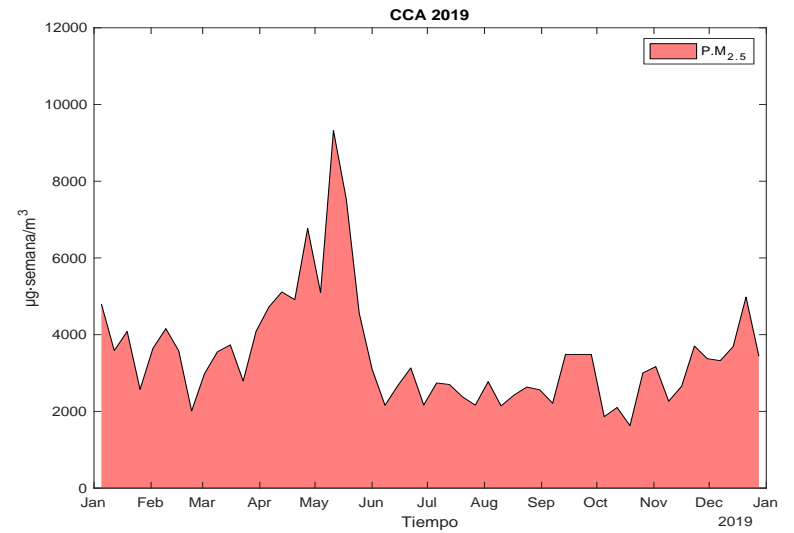


Figura 80. Perfil de exposición ambiental anual a PM_{2.5} CCA 2019.

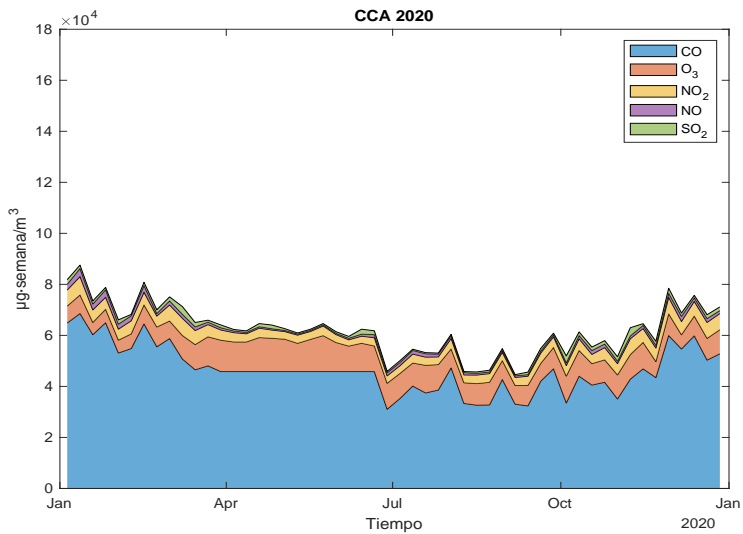


Figura 79. Perfil de exposición ambiental anual a gases CCA 2020.

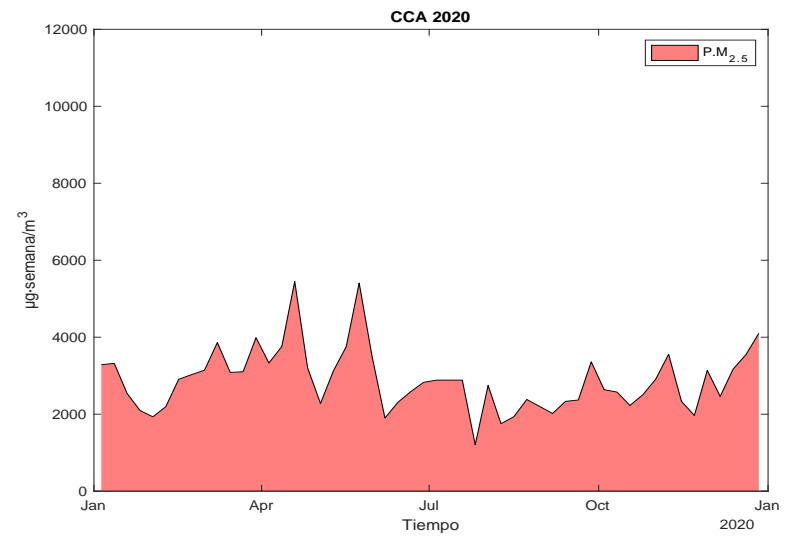


Figura 81. Perfil de exposición ambiental anual a PM_{2.5} CCA 2020.

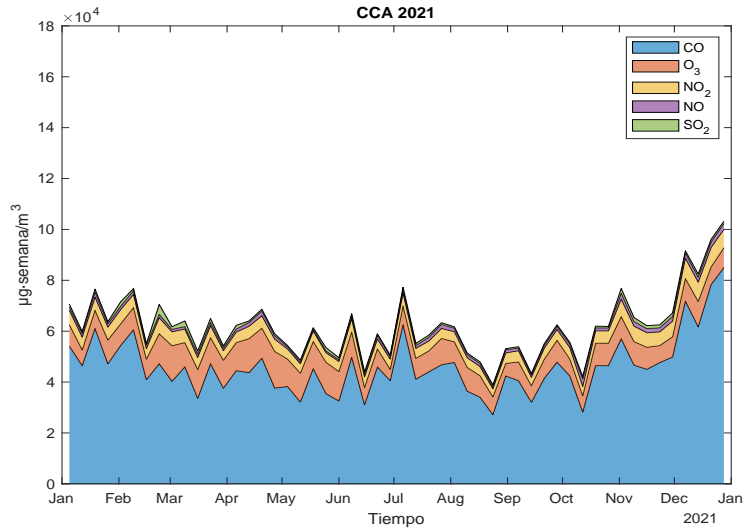


Figura 82. Perfil de exposición ambiental anual a gases CCA 2021.

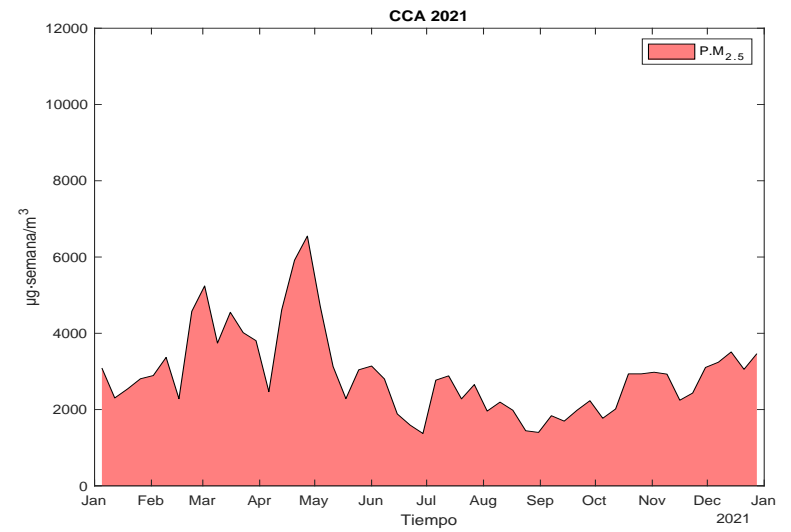


Figura 84. Perfil de exposición ambiental anual a PM_{2.5} CCA 2021.

Merced

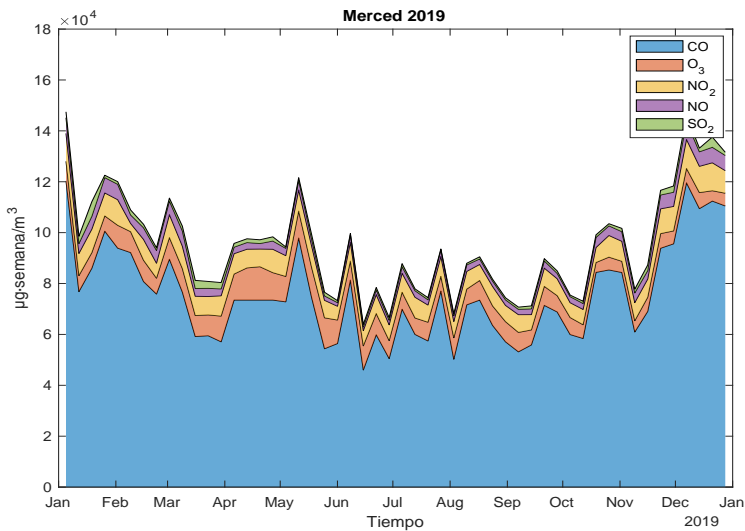


Figura 83. Perfil de exposición ambiental anual a gases MER 2019.

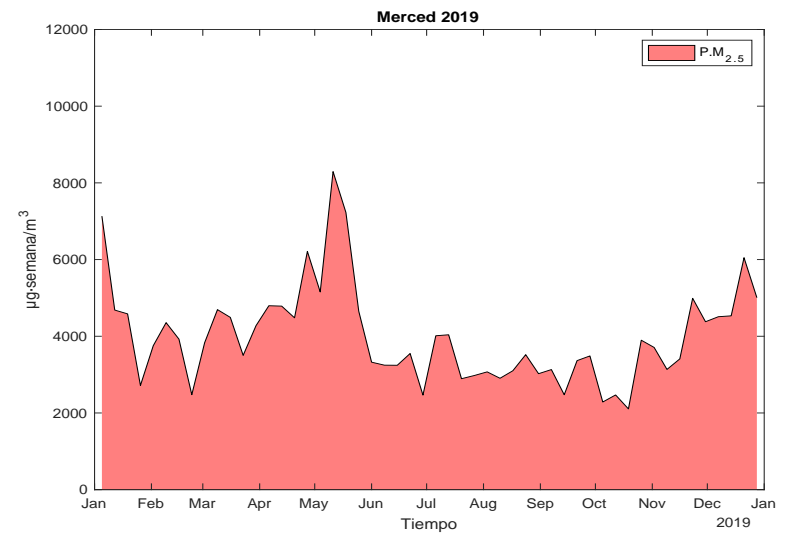


Figura 85. Perfil de exposición ambiental anual a PM_{2.5} MER 2019.

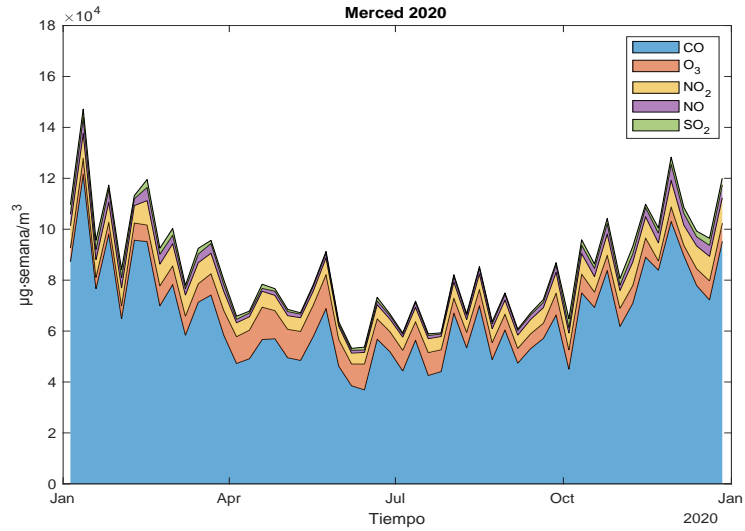


Figura 86. Perfil de exposición ambiental anual a gases MER 2020.

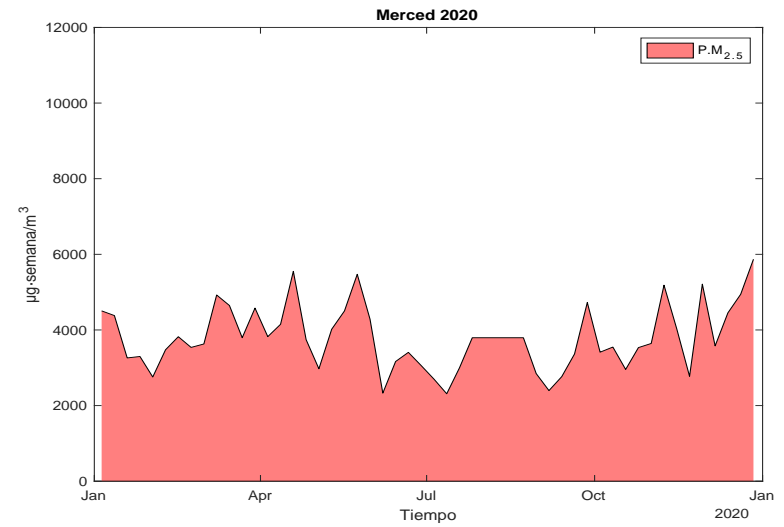


Figura 88. Perfil de exposición ambiental anual a PM_{2.5} MER 2020.

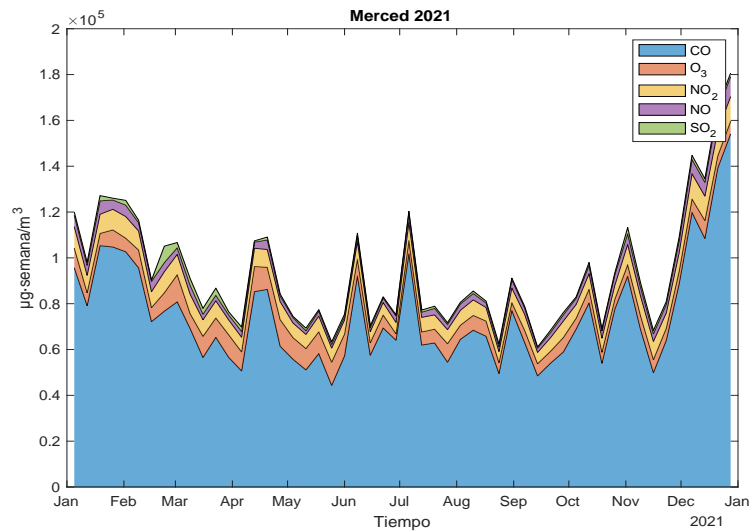


Figura 87. Perfil de exposición ambiental anual a gases MER 2021.

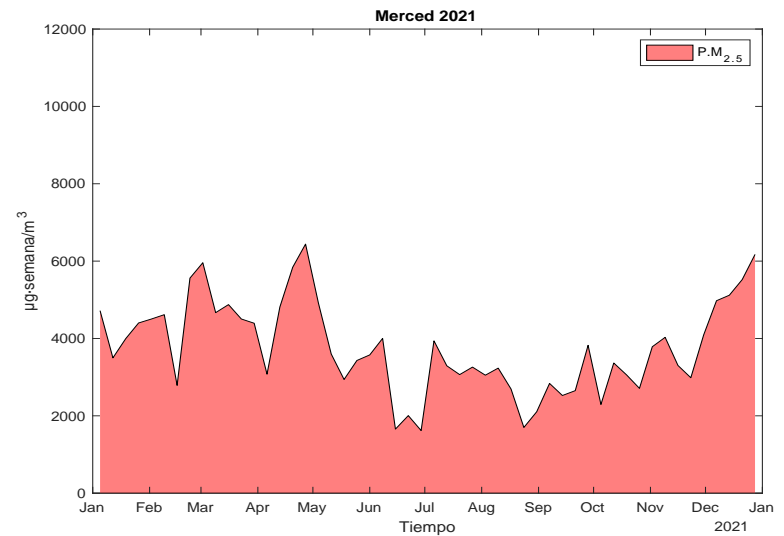


Figura 89. Perfil de exposición ambiental anual a PM_{2.5} MER 2021.

Nezahualc6yotl

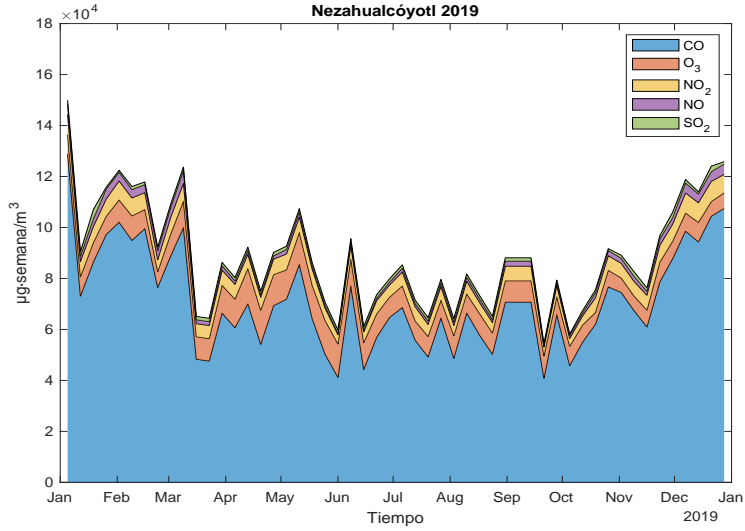


Figura 90. Perfil de exposici6n ambiental anual a gases NEZ 2019.

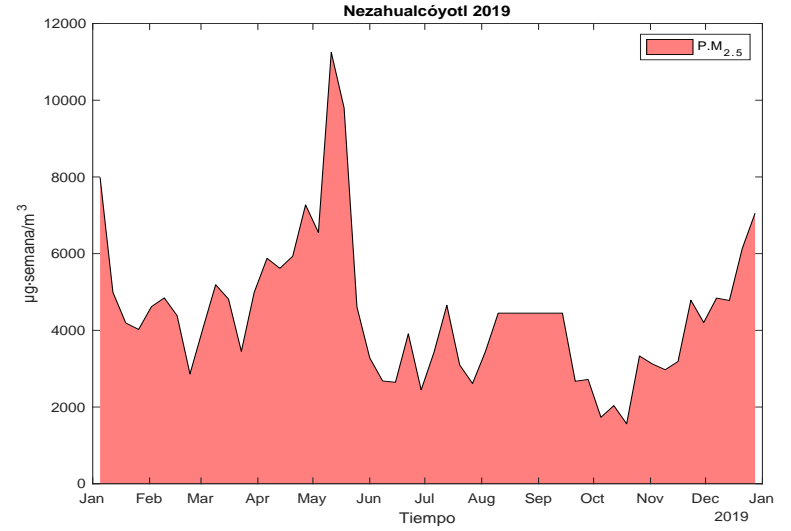


Figura 92. Perfil de exposici6n ambiental anual a PM_{2.5} NEZ 2019.

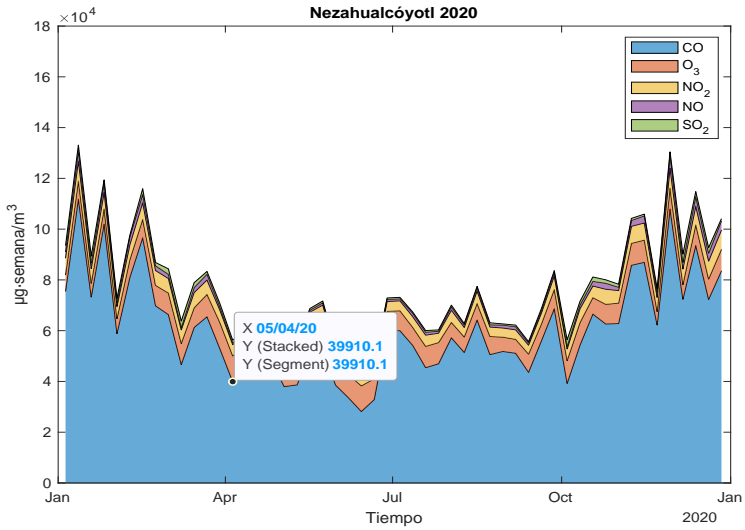


Figura 91. Perfil de exposici6n ambiental anual a gases NEZ 2020.

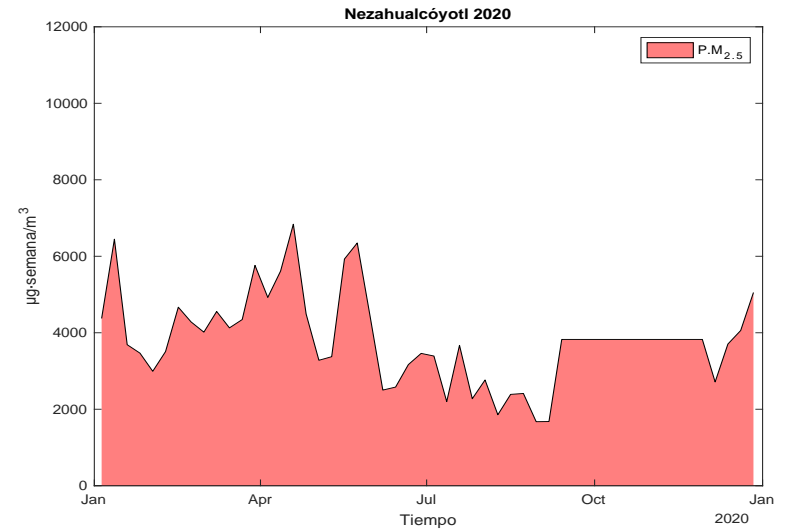


Figura 93. Perfil de exposici6n ambiental anual a PM_{2.5} NEZ 2020.

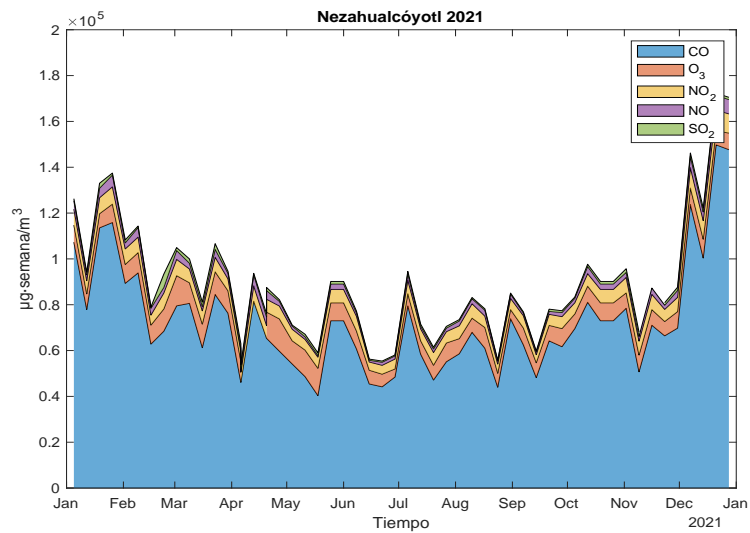


Figura 94. Perfil de exposici6n ambiental anual a gases NEZ 2021.

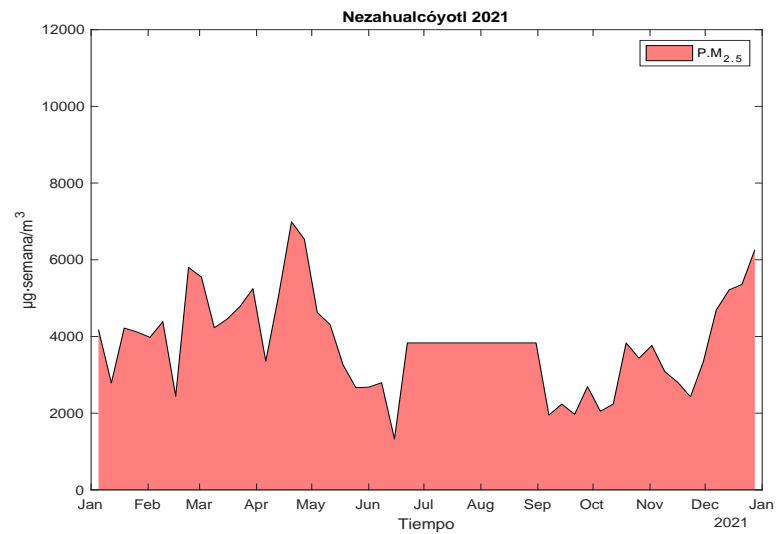


Figura 96. Perfil de exposici6n ambiental anual a PM₂.₅ NEZ 2021.

Santa Fe

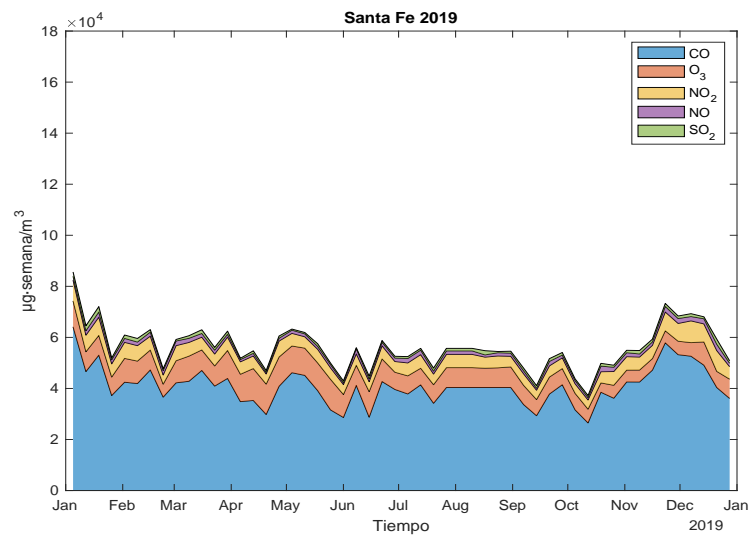


Figura 95. Perfil de exposici6n ambiental anual a gases SFE 2019.

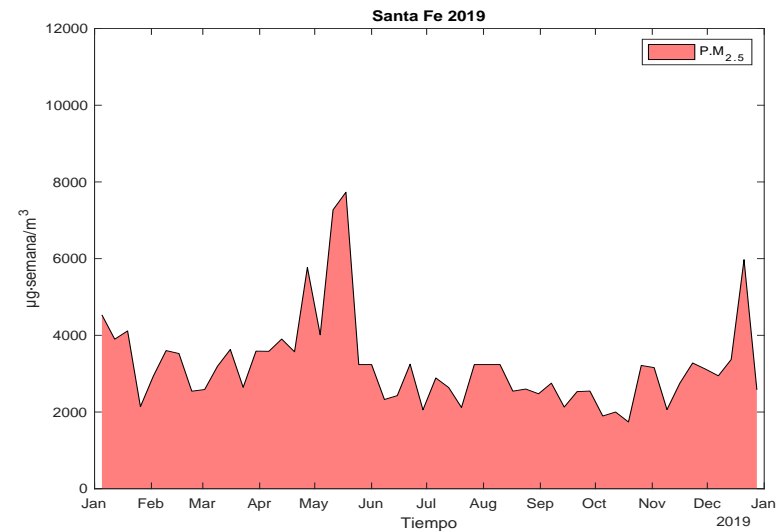


Figura 97. Perfil de exposici6n ambiental anual a PM₂.₅ SFE 2019.

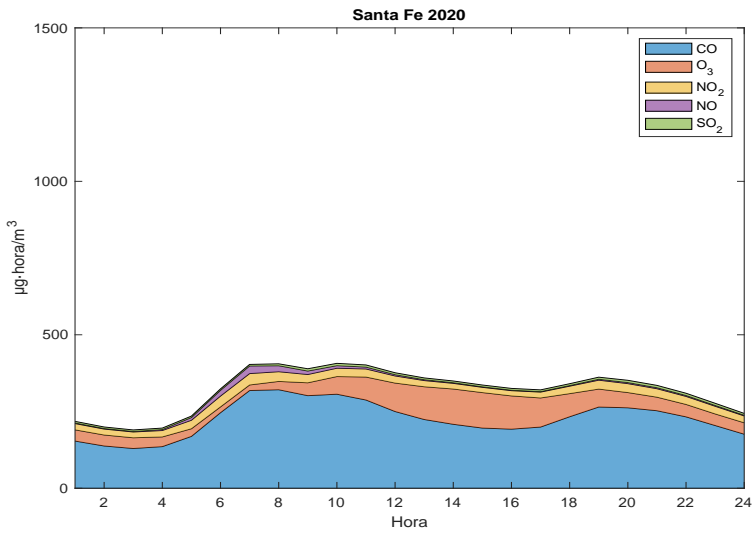


Figura 98. Perfil de exposición ambiental anual a gases SFE 2020.

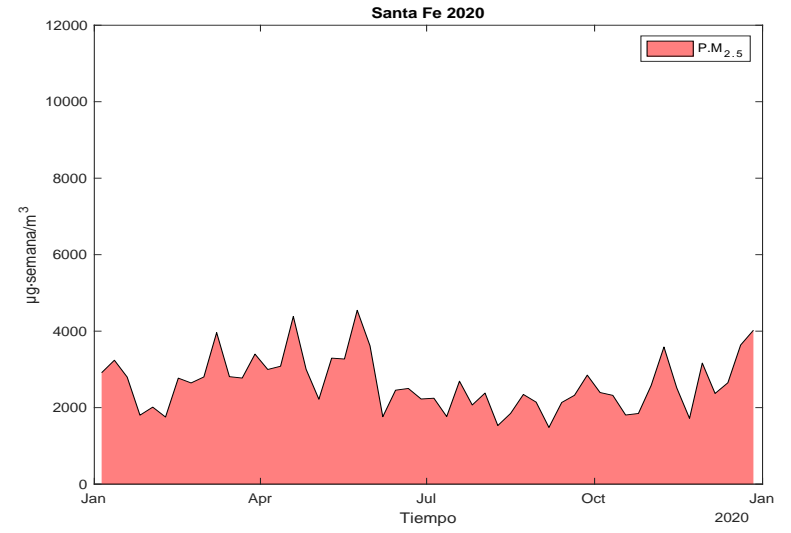


Figura 100. Perfil de exposición ambiental anual a PM_{2.5} SFE 2020.

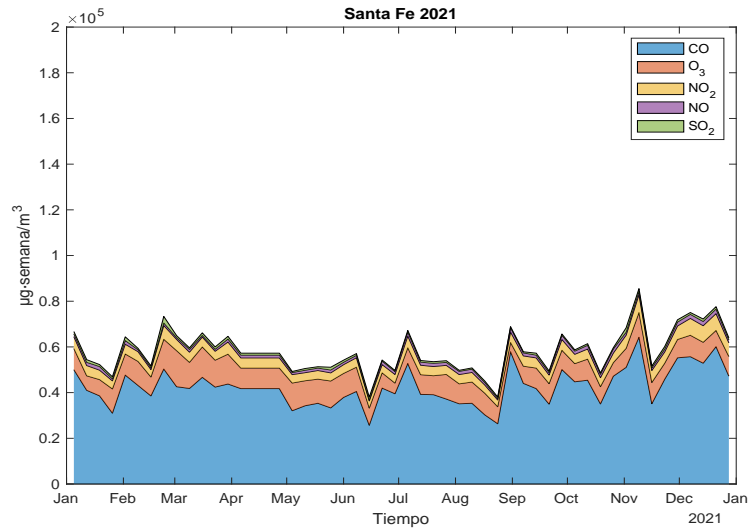


Figura 99. Perfil de exposición ambiental anual a gases SFE 2021.

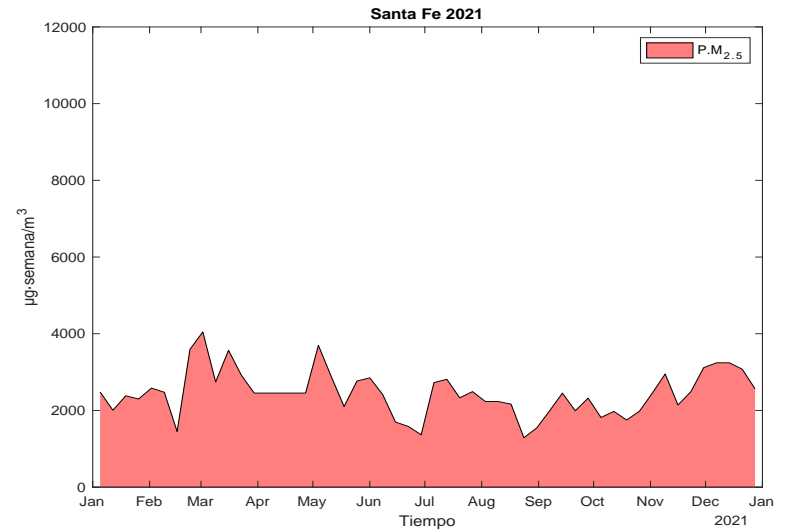


Figura 101. Perfil de exposición ambiental anual a PM_{2.5} SFE 2021.

Tlalnepantla

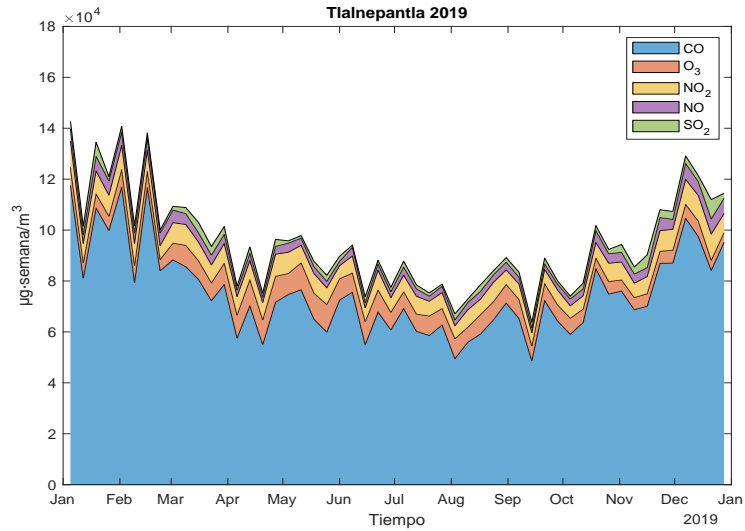


Figura 102. Perfil de exposición ambiental anual a gases TLA 2019.

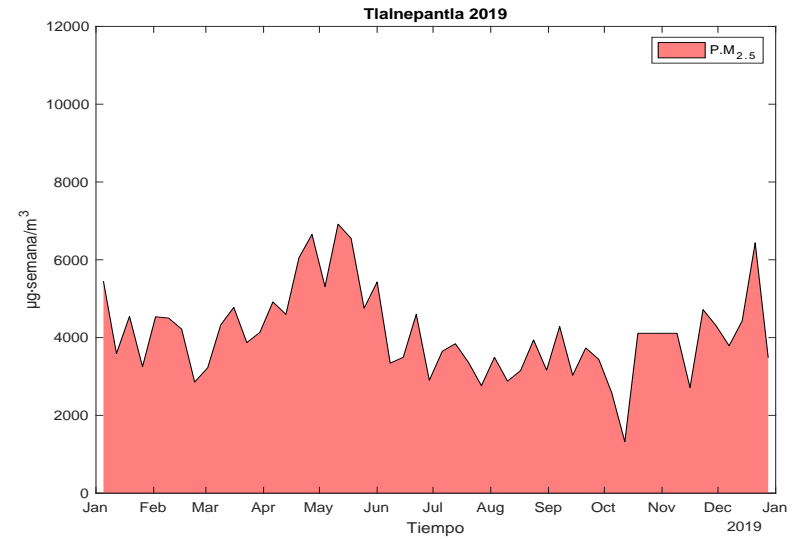


Figura 104. Perfil de exposición ambiental anual a PM_{2.5} TLA 2019.

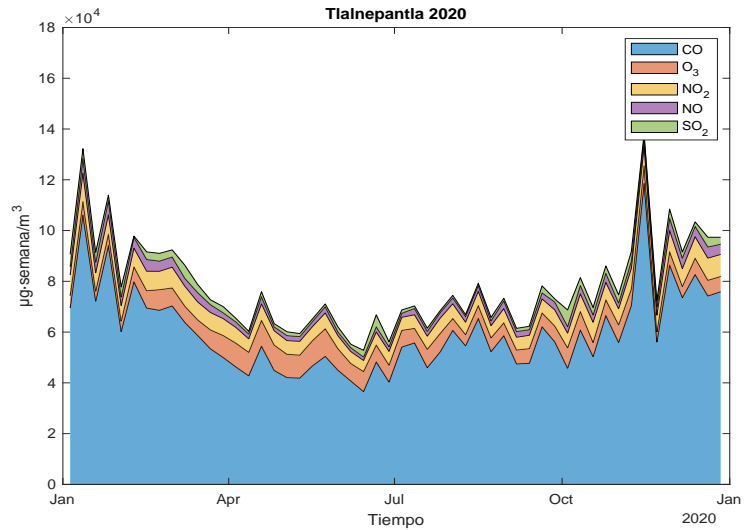


Figura 103. Perfil de exposición ambiental anual a gases TLA 2020.

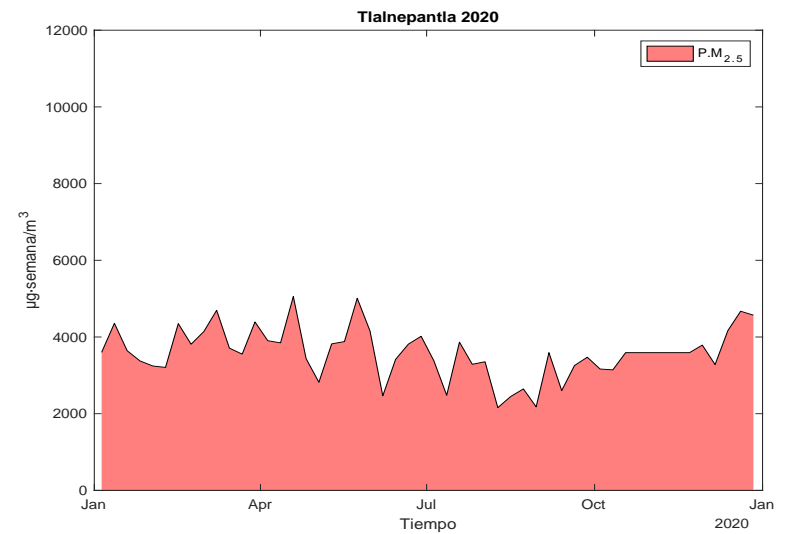


Figura 105. Perfil de exposición ambiental anual a PM_{2.5} TLA 2020

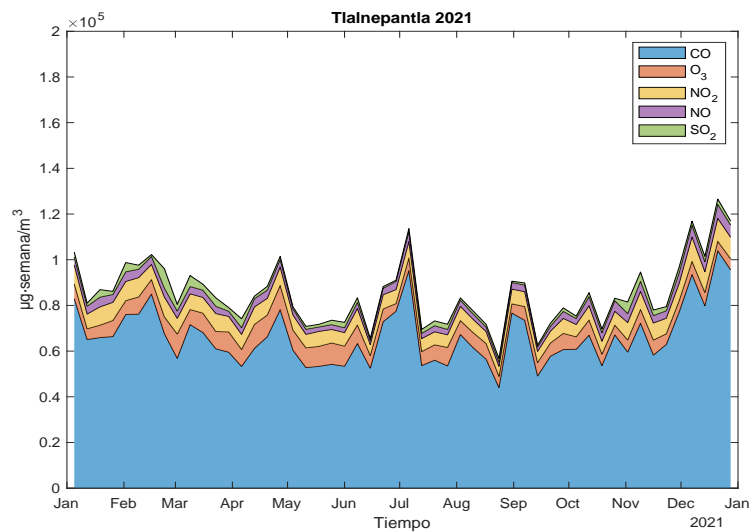


Figura 106. Perfil de exposición ambiental anual a gases TLA 2021.

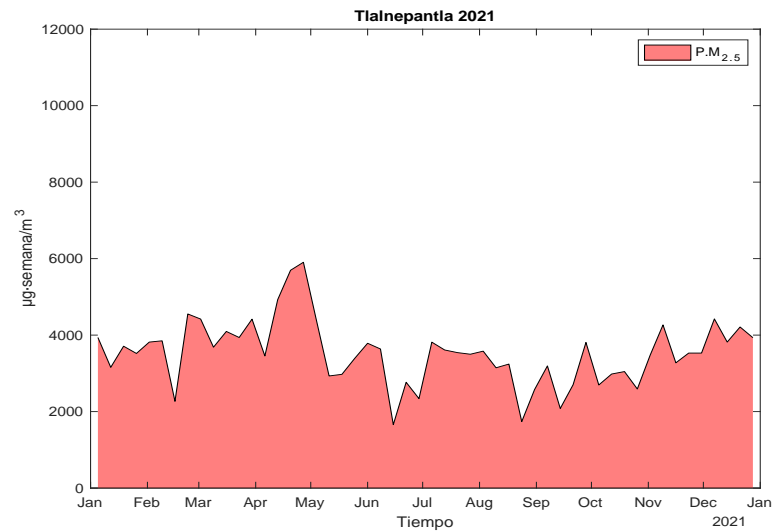


Figura 108. Perfil de exposición ambiental anual a PM_{2.5} TLA 2021.

UAM Xochimilco

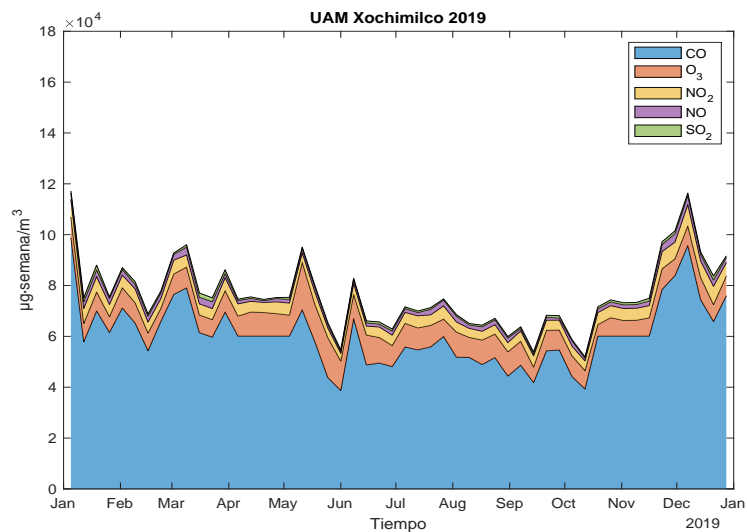


Figura 107. Perfil de exposición ambiental anual a gases UAX 2019.

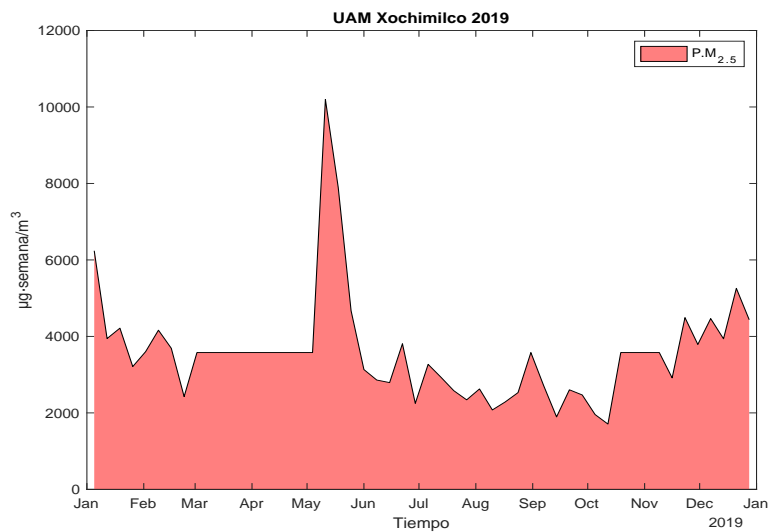


Figura 109. Perfil de exposición ambiental anual a PM_{2.5} UAX 2019.

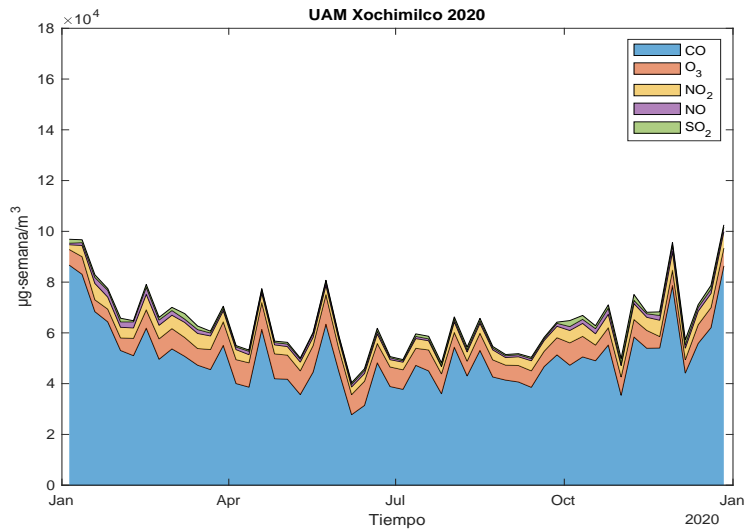


Figura 110. Perfil de exposición ambiental anual a gases UAX 2020.

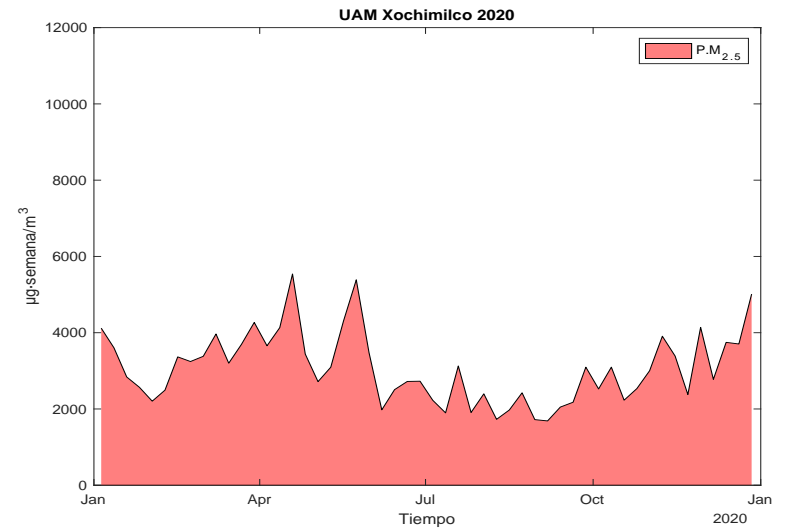


Figura 112. Perfil de exposición ambiental anual a PM_{2.5} UAX 2020.

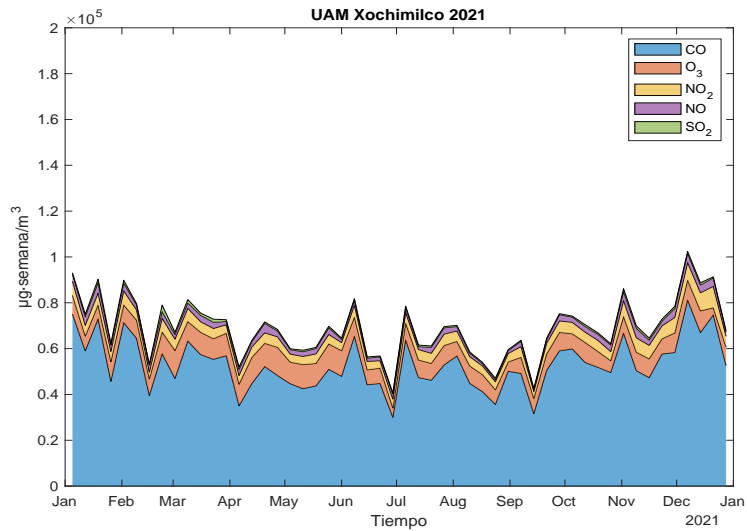


Figura 111. Perfil de exposición ambiental anual a gases UAX 2021.

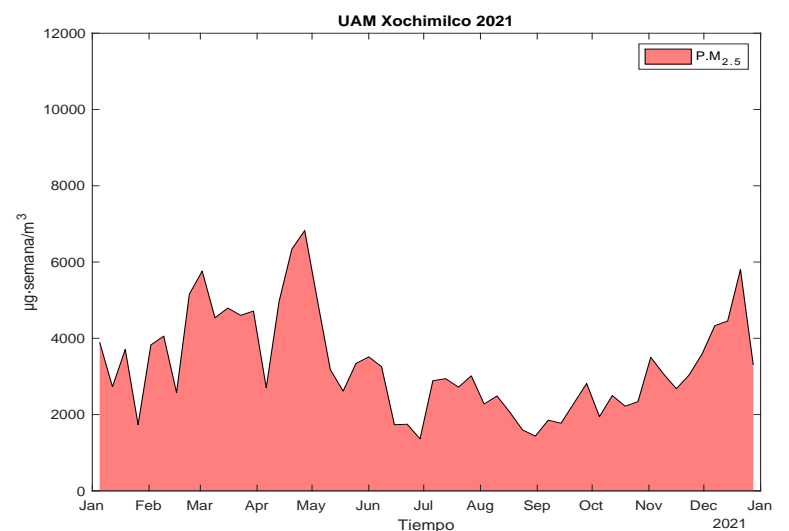


Figura 113. Perfil de exposición ambiental anual a PM_{2.5} UAX 2021.

FES Acatlán

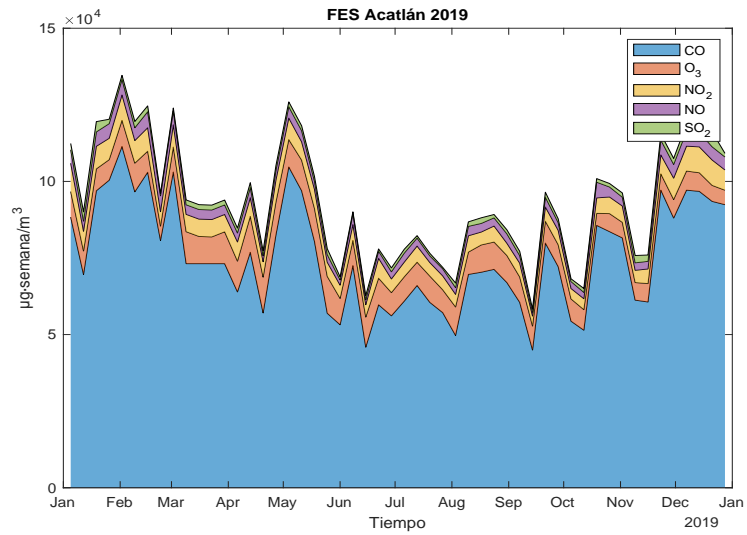


Figura 114. Perfil de exposición ambiental anual a gases FAC 2019.

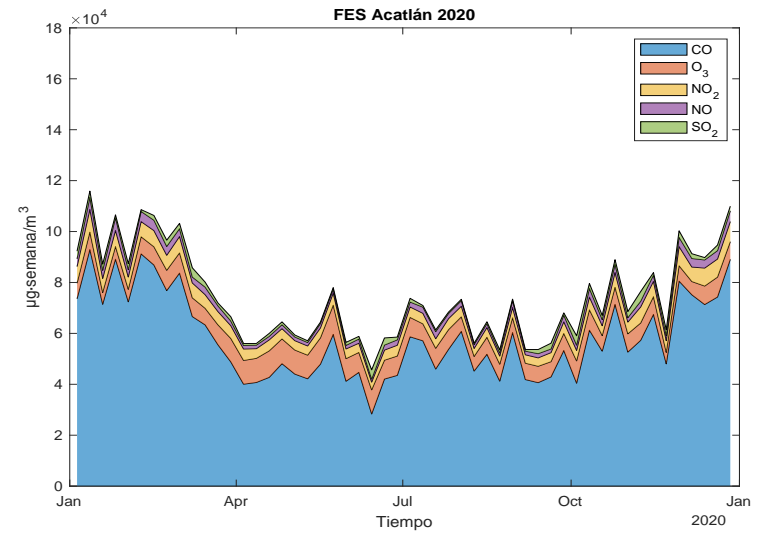


Figura 116. Perfil de exposición ambiental anual a gases FAC 2020.

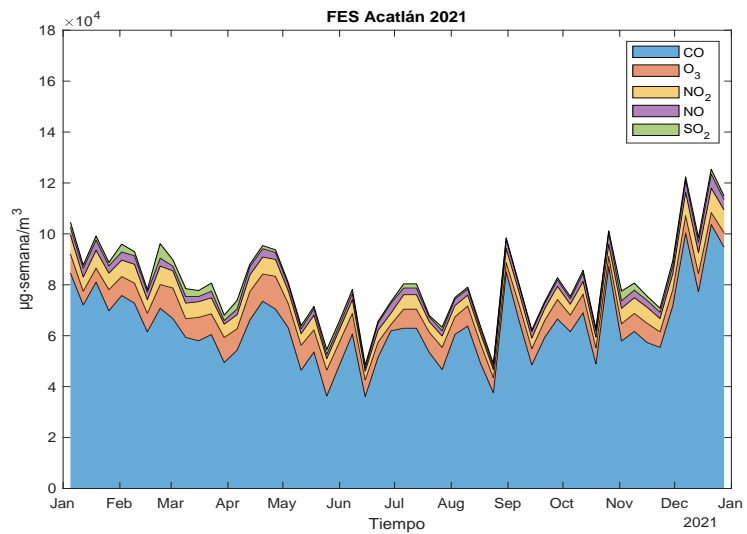


Figura 115. Perfil de exposición ambiental anual a gases FAC 2021.

Anexo C

Tabla 17. Desglose de población por estación dentro del radio de incidencia

Estación	0 a 2 años	3 a 11 años	+12 años femenino	+12 años masculino
NEZ	1908	7490	30537	27176
CCA	1215	4275	16941	15758
MER	1076	3919	16041	14159
UAX	643	2656	14913	13170
SFE	711	2463	8487	7625
TLA	431	1764	8438	7569
FAC	267	1086	6524	5793

Anexo D

Tabla 18. Tabla con valores de prueba de Dunn por pares para gases.

Año de comparación	2019-2020	2019-2021	2020-2021
CCA	0.091208	0.043840*	0.657922
FAC	0.000002*	0.005970*	0.045604*
MER	0.026226*	0.327629	0.200734
NEZ	0.006776*	0.850222	0.008338*
SFE	0.416119	0.371179	0.093912
TLA	0.000002*	0.024506*	0.013428*
UAX	0.000029*	0.024207*	0.055294

Nota: El * denota significancia

Tabla 19. Tabla con valores de prueba de Dunn por pares para el PM_{2.5}.

Año de comparación	2019-2020	2019-2021	2020-2021
CCA	0.07759	0.05365	0.76288
MER	1.00000	1.00000	0.79450
NEZ	0.10551	0.21047	0.62666
SFE	0.00623*	0.00006*	0.19279
TLA	0.03769*	0.01348*	0.62220
UAX	0.10000	0.30238	0.48850

Nota: El * denota significancia