Análisis de la contaminación por $PM_{2.5}$ en la ciudad de Monterrey, Nuevo León, enfocado a la identificación de medidas estratégicas de control.

Final

2019

centro mario molina

CENTRO MARIO MOLINA PARA ESTUDIOS ESTRATÉGICOS
SOBRE ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE A.C.

Dr. Mario Molina
Presidente

Ing. Carlos Mena
Director Ejecutivo

Dr. Antonio Mediavilla Sahagún
Coordinador de Proyectos

INTEGRANTES DEL PROYECTO

Martin Danilo Gómez Sánchez
Hugo Alberto Barrera Huertas
Jennifer García Escalante

COLABORADORES

Nancy Hernández Valdez

CONSULTORES EXTERNOS

Sergio Sánchez Martínez
Juan J. Castillo
Juliana Klakamp

Febrero de 2019

Agradecemos la aportación al Consejo Nacional
de Ciencia y Tecnología (CONACYT)
para la realización de este proyecto.

Prolongación Paseo de los Laureles 458 Despacho 406,
Col. Bosques de las Lomas, Cuajimalpa, C.P. 05120, México, D.

ÍNDICE

1. Introducción 8
2. Objetivos 13
   2.1 Resultados de estudios previos de $PM_{2.5}$ en el Área Metropolitana de Monterrey (AMM) 13
      2.1.1 Antecedentes de calidad del aire 13
      2.1.2 Estudios de monitoreo de partículas en el AMM 14
3. Meteorología 29
   3.1 Relieve 29
   3.2 Temperatura 30
   3.3 Humedad relativa y precipitación 32
   3.4 Presión Barométrica 37
   3.5 Viento 38
   3.6 Radiación solar 42
4. Características de población, transporte e industria en el AMM 45
5. Inventario de emisiones 45
   5.1 Identificación de las principales fuentes de emisión de contaminantes 45
   5.2 Fuentes de Información Consideradas en el Análisis (ProAires) 46
   5.3 Análisis de las emisiones en la ZMM 47
   5.4 Análisis de Emisiones por Tipo de Fuente 51
      5.4.1 Fuentes Fijas 58
      5.4.2 Fuentes Móviles Carreteras 60
      5.4.3 Fuentes de Área 61
6. Caso de Estudio: $PM_{2.5}$ en el Área Metropolitana de Monterrey 61
   6.1 Aspectos generales del área de estudio 61
7. Metodología 63
   7.1 Ejercicio de modelación con HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) 63
   7.2 Análisis de datos históricos de la calidad del aire en el AMM 64
   7.3 Diseño y realización de campaña de monitoreo de $PM_{2.5}$ en el AMM 65
      7.3.1 Sitio San Juan, Cadereyta-Nuevo León 67
      7.3.2 Sitio Universidad 67
      7.3.3 Sitio García 68
   7.4 Medición de NO_2 y SO_2 utilizando la técnica DOAS-Mobile 69
   7.5 Medición de $PM_{2.5}$ para evaluar concentraciones en transporte público 71
   7.6 Metrorrey y Línea 1 y 2 72

7.7 Ecovía Monterrey 73
7.8 Equipo utilizado 75
8. Resultados 77
8.1 Ejercicio de modelación con HYSPLIT para la campaña de monitoreo 77
8.2 Campaña de monitoreo para sitios fijos enfocados a $PM_{2.5}$ 80
8.3 Validación de base de datos gravimétricos 82
8.4 Estadística básica, variación de la concentración promedio de 24 h de $PM_{2.5}$ 83
8.5 Series de tiempo de $PM_{2.5}$ en García, San Juan y Universidad 85
8.6 Correlaciones entre contaminantes 86
8.7 Composición química de $PM_{2.5}$ en aire ambiente para sitio García, Universidad y San Juan 89
8.8 Especies de carbono 90
8.9 Estimación de aerosoles inorgánicos secundario (AIS) 91
8.10 Suma de especies química vs masa 93
8.11 Balance iónico 94
8.12 Correlación de especies solubles y totales 96
9. Análisis de datos históricos de calidad del aire en el AMM 98
9.1 Revisión de la información de monitoreo de la calidad del aire 98
9.2 Descripción de la Red de Monitoreo 99
9.3 Estaciones disponibles y cobertura 99
9.4 Estaciones y parámetros medidos 101
9.5 Análisis de Información de la Calidad del Aire 102
9.6 Metodología 102
9.7 Resultados y Análisis 103
9.7.1 Análisis de $PM_{2.5}$ 109
10. Resultados con DOAS 112
11. Resultados de monitoreo de concentraciones en transporte público 116
11.1 Metro 116
11.2 Distribución de concentraciones de $PM_{2.5}$ en Metrorrey 127
11.3 Ecovía 128
12. Líneas estratégicas 140
12.1 Medidas propuestas aplicables a Fuentes Fijas 141
12.2 Medidas propuestas aplicables Fuentes de Área 145
12.3 Medidas propuestas aplicables Fuentes Móviles 146
12.4 Otras medidas 149
13. Conclusiones 151
14. Bibliografía 156

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Porcentaje de días que no cumplieron con los límites del promedio diario de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el AMM 12
Tabla 2 Estadística básica de velocidad de viento AMM 2016..... 42
Tabla 3 Criterios para la Identificación de Fuentes Prioritarias de Emisión..... 47
Tabla 4 Metodologías empleadas en la elaboración del inventario de emisiones del AMM años base 2005 y 2013 47
Tabla 5 Resultados por fuente de emisión del Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana de Monterrey, año base 2013. 50
Tabla 6 Distribución de Emisiones por Tipo de Fuente (ton/año)..... 51
Tabla 7 Distribución Porcentual de Emisiones por Tipo de Fuente 54
Tabla 8 Sitios con su localización (latitud y longitud) en donde se llevaron a cabo mediciones DOAS. 69
Tabla 9 Descripción de muestras y análisis realizados a $PM_{2.5}$ colectados en el AMM durante la campaña del 4-8 de junio de 2018. 81
Tabla 10 Correlación entre iones y cationes en García y San Juan..... 98
Tabla 11 Nombres e identificadores de las estaciones automáticas de monitoreo de calidad del aire ubicadas en el AMM 100
Tabla 12 Tipo de estaciones en relación con las fuentes de emisión..... 103
Tabla 13 Área de influencia y clasificación de las estaciones 104
Tabla 14 Resultados del análisis de captura de información anual..... 106
Tabla 15 Cumplimiento de los límites normativos de Calidad del Aire para 2016108
Tabla 16 Resultados obtenidos a partir de mediciones con DOAS-mobile en el AMM 112
Tabla 17. Estadísticos Metro 128
Tabla 18. Estadísticos Ecovía 139
Tabla 19 Medidas propuestas para Fuentes Fijas..... 141
Tabla 20 Medidas propuestas para Fuentes de área 145
Tabla 21 Medidas propuestas para Fuentes Móviles 146
Tabla 22 Otras medidas 150

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diferentes tamaños de partículas $PM_{10-2.5}$ comparado con tamaños de células de la sangre, bacterias y virus 9
Figura 2 Ciclo atmosférico de los aerosoles. Fuente: https://www.e-education.psu.edu/meteo300/node/671..... 10
Figura 3 Días que sobrepasan los límites del promedio diario de PM_{10} en el AMM 11

Figura 4 Días que sobrepasan los límites del promedio diario de $PM_{2.5}$ en el AMM 11
Figura 5 Distribución de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire en el Área Metropolitana de Monterrey (AMM) hasta abril de 2018. Fuente (http://sinaica.inecc.gob.mx/ Consulta 09 abril 2018) 14
Figura 6 Contribución relativa de especies químicas en muestras de $PM_{2.5}$ colectadas entre Noviembre y diciembre de 2007. b) Factor de Enriquecimiento en los sitios de monitoreo Escobedo y Santa Catarina para muestras colectadas entre noviembre y diciembre de 2007. Fuente: Martínez et al. 2012. 16
Figura 7 Mediciones de metales pesados determinados en $PM_{2.5}$ dentro del Túnel Loma Larga realizado en Monterrey para el año 2006. a) Concentraciones másicas cuando existió tráfico pesado b) Cuando el tráfico fue moderado. c) Esquema del Túnel Loma Larga y posición de los muestreadores. Fuente: Mancilla et al, 2012..... 17
Figura 8 Distribución espacial de la concentración de $PM_{2.5}$ en el AMM desarrollado por Blanco-Jiménez et al. 2015, obtenidos con muestreadores Minivol en el periodo comprendido de Octubre-Diciembre 2014. Fuente: Blanco-Jiménez et al. 2015 18
Figura 9 Composición elemental de las fracciones gruesa (>2.5<10 µm) y fina (<2.5 µm) de los muestreos de PM_{10} con equipo Slit Jet Air Sampler, localizado en Obispado del 16 de diciembre de 2014 al 14 de marzo de 2015. Fuente: Blanco-Jiménez et al. 2015. 19
Figura 10 Mapa de localización del recorrido realizado por las unidades de la Ecovía. Fuente: INECC-2015 20
Figura 11 Equipos de monitoreo atmosférico utilizados durante el proyecto de "Estudio de Impacto por exposición a contaminantes generados por fuentes móviles que circulan en el corredor Ruiz Cortines - Lincoln. Segunda etapa" a) Monitor marca Langan modelo T15, para CO, b) Bomba de succión marca SKC, modelo 224-PCXR8 para monitoreo de $PM_{2.5}$, y c) Canister para muestreo de BTX. 20
Figura 12 Concentraciones de CO determinadas en los tres microambientes considerados en la campaña de mediciones de INECC-2015 b) Concentraciones de $PM_{2.5}$ determinadas al interior de las unidades de la Ecovía y vehículos particulares, y en las inmediaciones de la estación Asarco, ubicada en el cruce de las avenidas Guerrero y Ruíz Cortínez de la campaña INECC-2015, y c) Concentraciones de BTEX (ppb_v) determinadas en los distintos microambientes considerados durante la campaña INECC-2015..... 22
Figura 13 Municipios que tienen una mayor contribución de PM_{10} en Área Metropolitana de Monterrey (AMM) de acuerdo a ProAire del Estado de Nuevo León 2016-2025, (Cuadro 6 ProAire 2016-2025) 24

Figura 14 Municipios que tienen una mayor contribución de $PM_{2.5}$ en Área Metropolitana de Monterrey (AMM) de acuerdo a ProAire del Estado de Nuevo León 2016-2025(Cuadro 7 ProAire 2016-2025) 25
Figura 15 Micrografía de partículas colectadas en a) Estación Obispado, b) Estación San Nicolás, c) partícula basada en Carbono con superficie suavizada d) partícula rica en carbono con gran superficie porosa. Fuente: González et al. 2016..... 27
Figura 16 Izquierdo a) y b) Micrografía de partículas ricas en Si y O, partículas colectadas de una muestra de Partículas Suspendidas Totales. Derecha a) y b). Micrografía de partículas ricas en C, Ca y O, partículas colectadas de una muestra de Partículas Suspendidas Totales. Fuente: González et al. 2016..... 27
Figura 17 Relieve del estado de Nuevo León. Fuente: (INEGI, 2018) 30
Figura 18 Serie de tiempo del promedio diario de la temperatura del aire utilizando los datos de la Red de Monitoreo Atmosférico del Área Metropolitana de Monterrey. La línea roja corresponde al promedio diario calculado a partir de los registros de todos los sitios de monitoreo, el área sombreada en gris corresponde a una desviación estándar del promedio diario. (Elaboración propia con datos de la Red Automática de Monitoreo de Monterrey, 2018) 31
Figura 19 Serie de tiempo de la humedad relativa del Área Metropolitana de Monterrey 2016. La línea azul corresponde al promedio diario calculado a partir de los registros de todos los sitios de monitoreo, el área sombreada en gris corresponde a una desviación estándar del promedio diario..... 32
Figura 20 Precipitación y humedad relativa año 2014-2015 y 2016..... 33
Figura 21 Climograma de Monterrey. (Elaboración propia con datos del CNA, 2018) 34
Figura 22 Climograma de García. (Elaboración propia con datos del CNA, 2018) 34
Figura 23 Frecuencia de eventos de lluvia durante 2014-2015-2016..... 36
Figura 24 Serie de tiempo de los promedios diarios de la presión barométrica del AMM. La línea continua corresponde al promedio diario, mientras que la región marcada en gris corresponde a una desviación estándar. 37
Figura 25 Serie de tiempo de velocidad de viento en el AMM durante 2016. En la gráfica la línea morada indica el promedio diario, la región sombreada en gris corresponde a la desviación estándar. El gráfico se construyó empleando todos los datos de los sitios que miden este parámetro. 39
Figura 26 Serie de tiempo de la velocidad de viento del AMM. En la gráfica la línea azul oscura representa el promedio diario (2014,2015 y 2016), mientras que el área sombreada en azul claro corresponde a la desviación estándar. El gráfico se construyó, empleando todos los datos de los sitios que miden este parámetro..... 39

Figura 27 Series de tiempo de velocidad de viento del AMM por mes y semana durante el año 2016. El gráfico se construyó, empleando todos los datos de los sitios que miden este parámetro. 40
Figura 28 Rosa de Vientos AMM elaborada con información del Sistema de Monitoreo Ambiental de Monterrey (SIMA). Fuente: (Elaboración propia, 2018) 41
Figura 29 Rosa de vientos por temporadas del año 2016 elaborada a partir de los datos medidos por la red de monitoreo del SIMA. Fuente: (Elaboración propia, 2016) 42
Figura 30 Variación horaria promedio de la radiación solar global para diferentes meses de 2016. Los promedios se calcularon a partir de los valores horarios de todas las estaciones con datos válidos, para comparar los valores se utiliza la hora sin corrección por horario de verano. 43
Figura 31 Serie de tiempo con los promedio de los valores máximos diarios de la radiación global para los años 2015 y 2016. El promedio se estimó a partir de los máximos de las diferentes estaciones. Fuente (Elaboración propia, 2018) 44
Figura 32 Distribución porcentual por fuente de emisión del Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana de Monterrey, año base 2013. 51
Figura 33 Distribución porcentual por fuente de emisión del Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana de Monterrey, año base 2013. Fuente: Elaboración Propia con base en ProAire Nuevo León 56
Figura 34 Principales Fuentes de Emisión de SO_2 (%). Fuente: Elaboración propia con base en ProAire Nuevo León 57
Figura 35 Principales Fuentes de Emisión de Precursores de Ozono (%) 58
Figura 36 Ubicación de muestreador MiniVol para $PM_{2.5}$ y meteorología en sitio San Juan, Cadereyta Nuevo León. 67
Figura 37 Ubicación de muestreador EPAM 7500 para $PM_{2.5}$ ubicado en sitio Universidad, en la estación de monitoreo atmosférico de Universidad del municipio de San Nicolás de los Garza. 68
Figura 38 Ubicación de muestreador MiniVol para $PM_{2.5}$ en sitio García, en municipio de García Nuevo León 69
Figura 39 Líneas y estaciones del Metro-Rey que operan en el AMM 73
Figura 40 Ruta que sigue el transporte de masivo de pasajeros Eco-vía en el AMM 74
Figura 41 Tecnologías de vehículos en Metro y Ecovía de Monterrey 75
Figura 42 Tecnologías de vehículos en Metro y Ecovía de Monterrey 76
Figura 43 Técnico con equipo de monitoreo en transporte público 76
Figura 44 Ejemplo de hojas de campo usadas durante monitoreo de concentraciones en Metro Línea 2 (izquierda) y Ecovía (derecha) 77
Figura 45 Modelación con HYSPLIT-NARR, para el día 06 de junio de 2018, a las 12:00h (Hora Local), desde Refinería-Cadereyta 78

Figura 46 Modelación con HYSPLIT-NARR, para el día 06 de junio de 2018, a las 12:00h (Hora Local), desde una industria ubicada en el centro de la AMM 79
Figura 47 Modelación con HYSPLIT-NARR, para el día 06 de junio de 2018, a las 12:00h (Hora Local), desde pedrera (al noroeste de la AMM). 80
Figura 48 Interpretación de diagramas de caja y bigote Fuente: Elaboración propia, modificado de Salgado 1992 84
Figura 49 Estadística básica de $PM_{2.5}$ en los sitios fijos de muestreo para la campaña de monitoreo del 4 al 9 de junio de 2018. 85
Figura 50 Series de tiempo para $PM_{2.5}$ durante la campaña de monitoreo del 4-9 de junio de 2018 en el AMM. 86
Figura 51 Estadística básica de $PM_{2.5}$ en los sitios fijos de muestreo para la campaña de monitoreo del 4 al 9 de junio de 2018 87
Figura 52 Estadística básica de $PM_{2.5}$ en los sitios fijos de muestreo para la campaña de monitoreo del 4 al 9 de junio de 2018 88
Figura 53 Porcentaje de cuantificación de especies químicas en las muestras de $PM_{2.5}$ colectadas durante la campaña de muestreo en el AMM. 89
Figura 54 Porcentaje de cuantificación de carbono orgánico en las muestras de $PM_{2.5}$ colectadas durante la campaña de muestreo en el AMM. 91
Figura 55 Estimación de especies asociadas a fuentes de origen geológico, antropogénico y aerosoles inorgánicos secundarios a partir de muestras de $PM_{2.5}$ colectadas en el AMM 92
Figura 56 Comparación entre masa y suma de especies ($\mu g/m^3$) de $PM_{2.5}$ en las estaciones García, Universidad y San Juan. 94
Figura 57 Estadística básica de cationes y aniones en $PM_{2.5}$ durante la campaña AMM. 95
Figura 58 Correlación entre aniones y cationes en $PM_{2.5}$ en las estaciones García, Universidad y San Juan. 96
Figura 59 Correlación entre especies soluble (SO_4=) y elemento (azufre) para determinar el grado de disociación. 97
Figura 60 Datos de velocidad del viento reportados por la Estación La Pastora (SE) en 2016 105
Figura 61 Datos de velocidad del viento reportados por la Estación La Pastora (SE) en 2016 109
Figura 62 Gráfico polar anual por hora para $PM_{2.5}$, 2014 – 2016 111
Figura 63 Medición de NO_2 en Cadereyta realizada el 7 de junio del 2018 entre 15:40 y 15:50 GMT. 113
Figura 64 Medición de NO_2 en sitio industrial realizada el 4 de junio del 2018 entre 22:09 y 22:15 GMT 113
Figura 65 Medición de NO_2 en Centro de la Ciudad realizada el 5 de junio del 2018 entre 12:30 y 12:37 GMT. 114

Figura 66 Medición de NO_2 en Centro de la Ciudad realizada el 5 de junio del 2018 entre 12:30 y 12:37 GMT. 114
Figura 67 Medición de NO_2 en Centro de la Ciudad realizada el 6 de Junio del 2018 entre 15:41 y 15:48 GMT. 115
Figura 68 Medición de NO_2 en la Zona Metropolitana de Monterrey realizada el 8 de Junio del 2018 entre 13:10 y 14:15 GMT 115
Figura 69 Medición de SO_2 en Cadereyta realizada el 7 de Junio del 2018 entre 16:00 y 16:10 GMT. 116
Figura 70 Concentración de $PM_{2.5}$ en Línea 1 y Línea 2 de Metro Monterey realizados el 6 de junio de 2018 en horas de la mañana 117
Figura 71 Concentración de $PM_{2.5}$ en Línea 1 y Línea 2 de Metro Monterey realizados el 6 de junio de 2018 en horas de la tarde 117
Figura 72 Concentración de $PM_{2.5}$ en Línea 1 y Línea 2 de Metro Monterey realizados el 7 de junio de 2018 en horas de la mañana 118
Figura 73 Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas el 6 de junio de 2018 en horas de la mañana, recorrido E-NO y S-N 119
Figura 74 Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas el 6 de Junio de 2018 en horas de la mañana, recorrido NO-E y N-S 120
Figura 75 Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas el 6 de Junio de 2018 en horas de la tarde, recorrido E-NO y S-N 121
Figura 76 Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas el 6 de Junio de 2018 en horas de la tarde, recorrido NO-E y N-S 122
Figura 77 Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas el 7 de Junio de 2018 en horas de la mañana, recorrido E-NO y S-N 123
Figura 78 Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas el 7 de Junio de 2018 en horas de la mañana, recorrido NO-E y N-S 124
Figura 79 Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas el 9 de Junio de 2018 en horas de la mañana, recorrido E-NO y S-N 125
Figura 80 Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas el 9 de Junio de 2018 en horas de la mañana, recorrido NO-E y N-S 126
Figura 81 Diagrama de caja y bigotes del monitoreo de partículas $PM_{2.5}$ en Metrorrey (Línea 1 y Línea 2) 127
Figura 82 Mapas de concentración de $PM_{2.5}$ en Ecovía realizados el 6 de Junio de 2018 en horas de la mañana 129
Figura 83 Mapas de concentración de $PM_{2.5}$ en Ecovía realizados el 5 de Junio de 2018 en horas de la tarde 129
Figura 84 Mapas de concentración de $PM_{2.5}$ en Ecovía realizados el 8 de Junio de 2018 en horas de la mañana 130
Figura 85 Mapas de concentración de $PM_{2.5}$ en Ecovía realizados el 8 de Junio de 2018 en horas de la noche 130
Figura 86 Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas el 5 de Junio de 2018 en horas de la mañana, recorrido E- NO 131

Figura 87 Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas el 5 de Junio de 2018 en horas de la mañana, recorrido NO-E..... 132
Figura 88 Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas el 5 de Junio de 2018 en horas de la tarde recorrido E-NO 133
Figura 89 Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas el 5 de Junio de 2018 en horas de la tarde recorrido NO-E 134
Figura 90 Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas el 8 de Junio de 2018 en horas de la mañana recorrido E-NO..... 135
Figura 91 Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas el 8 de Junio de 2018 en horas de la mañana recorrido NO-E..... 136
Figura 92 Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas el 8 de Junio de 2018 en horas de la noche recorrido E-NO..... 137
Figura 93 Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas el 8 de Junio de 2018 en horas de la noche recorrido NO-E..... 138
Figura 94 Diagrama de caja y bigotes del monitoreo de partículas $PM_{2.5}$ en Ecovía 139

INDICE DE MAPAS

Mapa 1 Distribución de equipos y mediciones realizadas en la campaña de monitoreo del 4 al 9 de junio de 2018 en el Área Metropolitana de Monterrey (AMM)..... 3
Mapa 2 Rosa de Vientos del AMM año 2016. Mapa elaborado con información obtenida de la red de monitoreo del AMM 40
Mapa 3 Ubicación de las Fuentes Industriales de la ZMM y emisiones de CO_2.... 60
Mapa 4 Ubicación de los sitios fijos para el monitoreo de $PM_{2.5}$ en García (municipio de García), Universidad (municipio San Nicolás) y San Juan (municipio de Cadereyta)..... 66
Mapa 5 Ubicación de los sitios medidos con la técnica DOAS-mobile durante la campaña de monitoreo en el AMM..... 70
Mapa 6 Mapa general de rutas para medir $PM_{2.5}$ para evaluar concentraciones en transporte público 72
Mapa 7 Distribución del sistema de monitoreo atmosférico en la ZMM. Fuente: Elaboración propia con información de SIMA, 2018 (4) y SINAICA, 2018 (5) 101

RESUMEN EJECUTIVO

Durante los últimos años se ha reconocido la importancia de realizar estudios de contaminación en las principales Áreas Metropolitanas de México, ya que existe evidencia científica que éstas áreas han presentado graves problemas de contaminación atmosféricas, como es el caso del Área Metropolitana de Monterrey (AMM).

La calidad del aire de esta ciudad ha sido calificada en varias ocasiones como la peor del país, debido principalmente a las muy altas concentraciones de la fracción fina de las partículas suspendidas ($PM_{2.5}$), cuyos impactos a la salud son importantes, debido a que tiene la capacidad de penetrar profundamente en el tracto respiratorio humano, así como de contribuir significativamente en la formación de diversos compuestos orgánicos e inorgánicos secundarios y atenuar la luz visible.

Las $PM_{2.5}$ se pueden clasificar de acuerdo a su origen en primarias (aquellas emitidas directamente por la fuente a la atmósfera), y secundarias (formadas en la atmósfera por transformaciones químicas y físicas a partir de contaminantes "precursores").

El objetivo principal de este proyecto fue analizar la problemática de calidad del aire en el AMM con respecto a $PM_{2.5}$ primarias y secundarias, para generar información que permita tener un mejor entendimiento de sus fuentes, sus transformaciones y transporte, de forma que esto permita evaluar y proponer medidas de reducción de emisiones tanto de $PM_{2.5}$ primarias, como de sus precursores.

Para este fin, se analizaron datos históricos de calidad del aire en la región, y paralelamente se realizaron ejercicios de modelación para entender los patrones típicos de dispersión de contaminantes atmosféricos en el AMM. Asimismo, se identificó la mejor ubicación de sitios potenciales de monitoreo para la colecta de $PM_{2.5}$ durante una campaña de muestreo que se desarrolló del 04 al 09 de junio de 2018, que es cuando las condiciones meteorológicas en la región presentan históricamente temperaturas elevadas y altas concentraciones de partículas suspendidas.

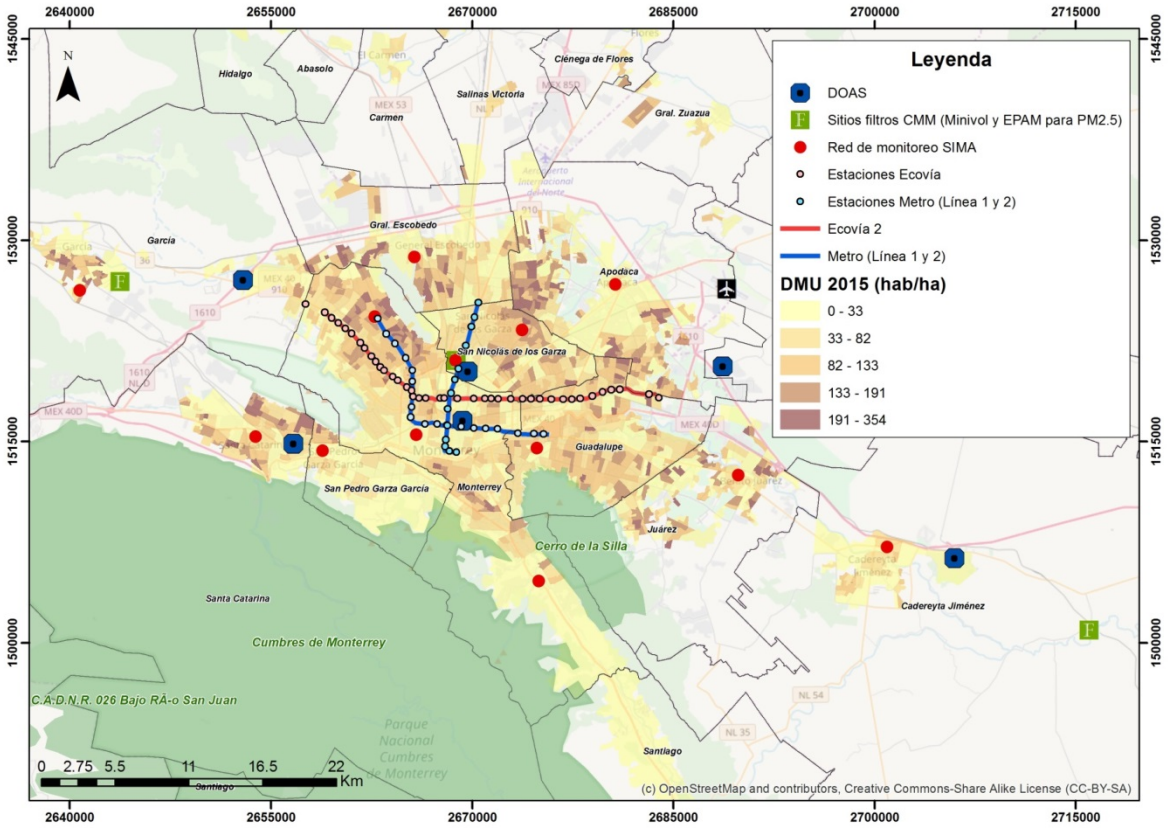
Se seleccionaron dos sitios fijos para la colecta de partículas $PM_{2.5}$ con equipos Minivol que se ubicaron en la localidad de San Juan, al sureste del AMM y justo viento arriba (libre de la influencia) de la pluma que emite la refinería de Cadereyta para conocer las concentraciones de fondo. El segundo sitio se localizó en el municipio de García al noroeste del AMM en una región que se caracteriza por contar con empresas pedreras que aportan concentraciones importantes de material particulado, el cual, de acuerdo con los ejercicios de modelación, es un sitio receptor de contaminantes.

Adicionalmente se contó con un tercer sitio que operó un menor tiempo debido a problemas logísticos, que sirvió como referencia de las características de una zona con alta actividad antropogénica, ubicado en el centro del AMM, dentro de las instalaciones de la Universidad Autónoma de Nuevo León. (ver Mapa 1)

De forma complementaria a las mediciones con equipos fijos de $PM_{2.5}$, se utilizaron equipos portátiles de $PM_{2.5}$ (PDR) para conocer niveles de concentración en el transporte público que circula en el AMM.

Asimismo, se realizaron mediciones de NO_2 y SO_2 utilizando la técnica de DOAS-Mobile en diferentes industrias dentro y fuera de la AMM, así como estimaciones del índice de mortalidad para la población que habita en el AMM.

Mapa 1 Distribución de equipos y mediciones realizadas en la campaña de monitoreo del 4 al 9 de junio de 2018 en el Área Metropolitana de Monterrey (AMM).



Los hallazgos más importantes de esta serie de investigaciones se mencionan a continuación:

Se comprobó mediante ejercicios de modelación y análisis de datos históricos de dirección y velocidad del viento, que la dirección predominante en la que se desplaza el aire, va del sector Este y Sureste hacia el Noroeste, por lo que los municipios ubicados en ese sector (municipio de García) serán, por buena parte del año, sitios receptores de parcelas de aire cargadas de contaminantes atmosféricos, que se emiten desde el Este y Sureste de Monterrey (municipio de Cadereyta y Pesquería), en donde se ubica la refinería de petróleo de Cadereyta y la Central Termoeléctrica de Ciclo Combinado de Pesquería respectivamente.

A las emisiones de estas industrias en el sureste del AMM, se les suman aquellas a su paso dirigiéndose hacia el noroeste, provenientes de fuentes fijas y móviles que operan y circulan en el centro de la ciudad, por lo que usualmente los niveles más altos de PM_{10} y $PM_{2.5}$ se registran justamente en la zona de García, ubicada al

Noroeste, debido a este arrastre de contaminantes, además de la contribución de fuentes locales de actividad extractiva que ahí se desarrollan (pedreras).

Con relación al análisis histórico de datos de calidad del aire del 2014 al 2016, se encontró que muy pocas estaciones cuentan con mediciones de $PM_{2.5}$ y aquellas que lo realizan no cumplen con el 75% de suficiencia de datos para realizar análisis estadísticamente representativos (al menos 273 datos al año). Sin embargo, analizando los datos de aquellas estaciones que cumplieron con al menos el 40% de suficiencia de datos (al menos 146 registros); se observó que hay excedencias recurrentes de concentraciones que rebasan las normas de calidad del aire para $PM_{2.5,}$ PM_{10} y O_3, siendo la época fría-seca (diciembre-febrero) los meses en los que se presentan las más altas concentraciones de $PM_{2.5}$, sobre todo en las estaciones ubicadas al Noroeste (San Bernabé) y en algunos casos al Noreste (Apodaca y San Nicolás) del AMM. Los contaminantes SO_2 y NO_2 no presentaron excedencia para el año 2016.

Con respecto a la composición química o “especiación” de las $PM_{2.5}$ recolectadas en las muestras, se encontró que en promedio el porcentaje de especies cuantificadas fue del 31-45% del total de la masa colectada; siendo García el sitio con una mayor fracción de especies de sulfatos y nitratos (precursores de aerosoles inorgánicos secundarios) con aproximadamente 15.97% de la masa total de $PM_{2.5}$ colectada; mientras que en San Juan se estimó que estas dos substancias contribuyen con alrededor de 12.5% de la masa total. En Universidad las especies que predominaron fueron las asociadas a origen geológico (Al, Si, Ca, Fe) con un porcentaje de 25% con respecto a la masa total, atribuidas a fuentes de emisión con giros industriales dedicados a la producción de cemento y vidrio.

Adicionalmente se identificó una fuerte correlación entre los iones sulfato y amonio en los sitios de García y San Juan que se atribuyen a la presencia de sales de sulfato de amonio, que son utilizados en la zona principalmente como fertilizantes agrícolas.

Los resultados de carbono orgánico (OC) mostraron que las partículas recolectadas en San Juan estuvieron compuestas al 100% de esta substancia, atribuible a una fuerte presencia de quema de combustibles fósiles asociado a la refinación de petróleo y generación de energía eléctrica que ahí ocurren. Por su parte, las partículas recolectadas en García contenían un 85% de OC, atribuible a que en esta zona también existen industrias como las pedreras que utilizan una buena cantidad de combustibles fósiles.

Los resultados de las mediciones de NO_2 con DOAS-Mobile indicaron que la pluma de contaminante emitidos por parques industriales en el centro de la ciudad, se dirigieron hacia el Oeste.

En Cadereyta la pluma de contaminantes se dirigió hacia el sector Noroeste, comprobando así los patrones de circulación regional de las plumas de NO_2 viajando del Este hacia el Noroeste de acuerdo a lo comentado anteriormente.

Los resultados obtenidos de las mediciones realizadas a bordo del transporte público, mostraron que las concentraciones más altas de $PM_{2.5}$ ocurrieron en la Línea 2 del Metro (Metrorrey) durante los recorridos matutinos, (19 y 25 $\mu g/m^3$ teniendo picos entre 67-76 $\mu g/m^3$) en el momento en que el tren se aproximaba a la estación “Niños Héroes”, en cercanía de parques industriales en el centro de la ciudad. Para el caso de la Ecovía las concentraciones máximas registradas también ocurrieron durante la mañana (22 y 34 $\mu g/m^3$ y máximos supriores a las 66 $\mu g/m^3$) cuando el transporte pasaba cerca de los mismos parques industriales centrales.

Es de llamar la atención que de los cinco días durante los que se tomaron muestras de $PM_{2.5}$, dos de estos presentaron excedencias a los niveles máximos permisibles de concentración de este contaminante (> 45 $\mu g/m^3$) tanto en García como en San Juan, a pesar de que en la época en la que se llevaron a cabo las emisiones no se presentan las condiciones meteorológicas más desfavorables del año. Ello hace suponer que durante los meses en los que se presenta estabilidad atmosférica (temporada fría-seca entre diciembre y febrero) las concentraciones y las excedencias a las normas son mucho más agudas y frecuentes.

Considerando todo lo anterior nos parece urgente la necesidad de fortalecer la infraestructura de monitoreo de la calidad del aire para gases contaminantes, y material particulado PM_{10} y sobre todo $PM_{2.5}$ y carbono negro, de forma que se cuente con la información necesaria para tomar decisiones contundentes, mejorar los inventarios de emisiones, y sentar las bases de un sistema robusto de gestión.

Si bien los hallazgos encontrados durante la ejecución de este proyecto orientan de manera preliminar la recomendación de medidas y políticas de reducción de

emisiones contaminantes, nos parece fundamental que se lleve a cabo una campaña de muestreo y análisis de composición de partículas robusto y representativo de cada una de las distintas épocas del año, de forma que se recopilen los datos necesarios para realizar una identificación mucho más precisa de las principales fuentes de contaminantes y precursores, su transporte y cambios fisicoquímicos en la atmósfera y el impacto directo que provocan en salud de la población por exposición aguda y crónica, lo cual derivará en recomendaciones de política mucho más precisas y efectivas.

Finalmente, las principales recomendaciones de políticas de reducción de emisiones derivadas de los resultados de este proyecto se resumen a continuación:

Fuentes Industriales

- Reubicar en el mediano plazo a la industria pesada y altamente contaminante que opera en el centro de la ciudad provocando efectos negativos significativos.
- Las industrias que no sea posible reubicar en el corto y mediano plazos, deben instalar tecnologías modernas anticontaminantes y utilizar combustibles más limpios, como es el gas natural en sustitución del combustóleo y otros hidrocarburos pesados.
- Debe prohibirse de manera progresiva pero inmediata, el uso de combustóleo en toda el AMM, como se ha hecho ya en otras zonas metropolitanas del país, de forma que se reduzcan significativamente las emisiones de $PM_{2.5}$ y SO_2, priorizando así la salud de la población.
- Aprovechar el liderazgo industrial de la región para gestionar un Pacto por la Calidad del Aire con las industrias, que permita la implementación de medidas de reducción de emisiones y la modernización industrial.

Fuentes Móviles

- La introducción de tecnologías vehiculares como son vehículos de carga y de transporte público a diésel que cumplan al menos con los estándares de emisión Euro VI o equivalente, representa una de las mayores oportunidades de reducción de NOx, COVs y $PM_{2.5}$ primarias.

- Promover el uso integral del transporte público de forma que se reduzca el índice de motorización, el cual en algunos municipios es el más alto del país.
- Chatarrización de unidades de transporte de carga y pasajeros que tenga una antigüedad mayor a 20 años, como primera etapa, acoplado a medidas relacionadas a beneficios fiscales que maximicen la sustitución.
- Gestionar con los proveedores de combustible la necesidad de disponer de combustibles fósiles de ultra bajo azufre y con formulaciones ad-hoc y funcionales para las distintas condiciones meteorológicas específicas que se presentan en el AMM.
- Las medidas aplicables a fuentes móviles deben implementarse de manera conjunta con estrategias de movilidad sostenible empresarial de forma que se reduzca la demanda.

Fuentes de Área

- En particular, frente a las emisiones del sector construcción, se recomienda una visión de clústeres que abarque buenas prácticas en las diferentes actividades del sector, como son: uso de materiales, transporte, desarrollo de obras y disposición de residuos.

Aspectos Generales

- Se recomienda avanzar de manera inmediata y urgente con la implementación de las medidas recomendadas, para evitar el crecimiento de emisiones que se tiene proyectado hacia futuro en el caso de que no se implementen las mismas con celeridad.
- Adicionalmente a las medidas mencionadas, se recomienda mejorar y fortalecer los sistemas de gestión de la calidad del aire implementados actualmente de manera precaria. Esto incluye el fortalecimiento de la red de monitoreo atmosférico, la actualización y sistematización continuas de los inventarios de emisiones, la participación de grupos ciudadanos como contraparte “auditora” del progreso, y la posible vinculación a campañas globales por el aire limpio, como lo han hecho ya otras zonas metropolitanas del país.

1. Introducción

Las grandes y medianas ciudades mexicanas presentan desde hace años altos niveles de partículas $PM_{2.5}$ que por sus impactos en la salud de la población (WHO, 2013) y de los ecosistemas, se requiere la implementación de estrategias que, partiendo de información y conocimiento, sean efectivas en la reducción de las concentraciones de este contaminante.

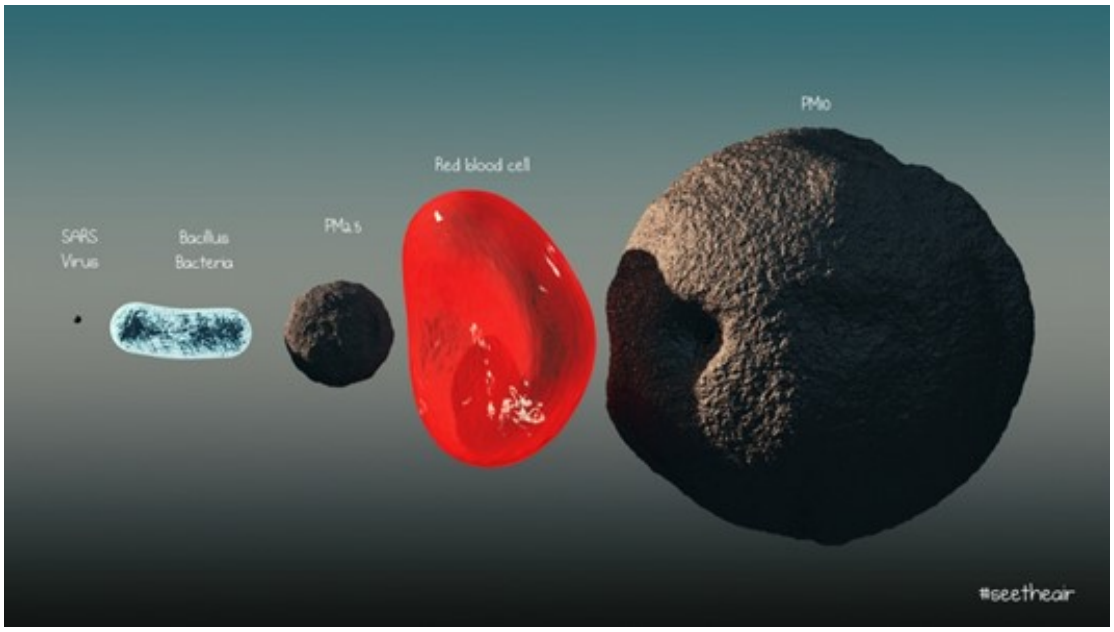
Una de las ciudades del país que ha presentado mayores concentraciones históricas de $PM_{2.5}$ es la ciudad de Monterrey, Nuevo León, sin embargo, no ha sido prioridad en la gestión de la calidad del aire local tomar medidas efectivas de reducción de este contaminante. Por ello, el presente proyecto propone generar información y conocimiento sobre fuentes de emisión, dinámica y química atmosférica de esta Ciudad, para diseñar y proponer medidas efectivas de reducción de partículas $PM_{2.5}$ y de sus precursores, dirigidas a reducir el impacto en la salud de su población y ecosistemas.

Estas partículas finas, debido a su tamaño tan pequeño, incluso más que los mismos glóbulos rojos de la sangre (Ver Figura 1), son capaces de penetrar profundamente en el tracto respiratorio humano, así como de contribuir significativamente a la formación de diversos compuestos orgánicos secundarios y atenuar la luz visible.

Estudios previos como Valavanidis et al. 2014 y Wei et al. 2009 han descubierto que la exposición humana a emisiones de hollín causa un estrés oxidativo en la sangre provocando un incremento del número de glóbulos rojos originando la enfermedad de Policitemia (cuyos síntomas son dificultad respiratoria, piel azulada, mareo, fatiga, sangrado excesivo, hinchazón de vaso y dolor de cabeza).

La evidencia que relaciona la contaminación del aire, particularmente los contaminantes criterio como el dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO_2), ozono (O_3), material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$) y compuestos orgánicos volátiles (COVs), y sus efectos negativos en la salud es abrumadora, como lo demuestran diversos estudios Lin, Y et al, (2017); Heft-Neal, S (2018); Killian, J et al (2018); Guxens, M et al (2018); O'Donovan, G et al (2017); Parent, M et al (2013); Fajersztajn, L et al (2013) describen los efectos de los contaminantes atmosféricos en la calidad de vida y las tasas de mortalidad de la población expuesta a ellos

Figura 1 Diferentes tamaños de partículas $PM_{10-2.5}$ comparado con tamaños de células de la sangre, bacterias y virus

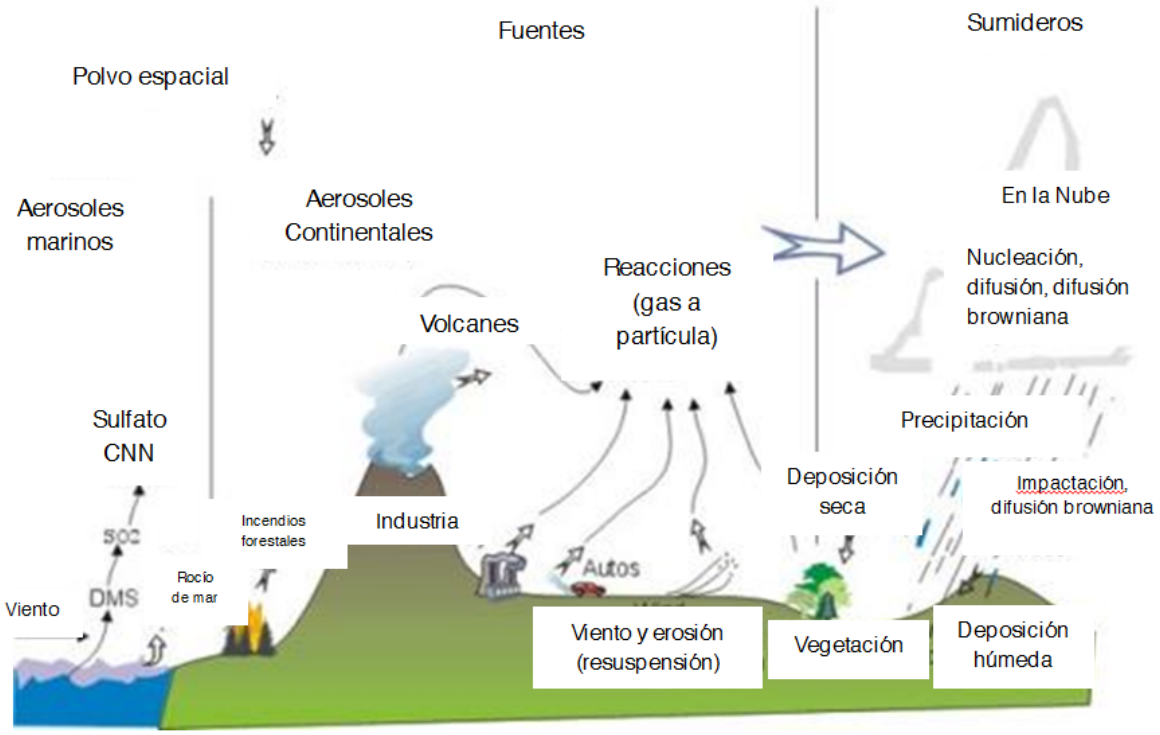


Las partículas pueden ser emitidas por fuentes naturales (volcanes, vegetación) o antropogénicas (combustibles fósiles, quema de biomasa). Así mismo la generación de partículas puede darse por emisiones primarias o por reacciones químicas de algunos gases precursores en la atmósfera que propician la generación de nuevas partículas (formación secundaria).

Las partículas primarias son emitidas directamente en forma sólida de fuentes como la quema de biomasa, la combustión incompleta de combustibles fósiles, erupciones volcánicas, transporte, resuspensión de suelos, polvo mineral, sal de mar y material biológico (fragmento de plantas, microorganismos, polen, etcétera). Por otro lado, las partículas secundarias son formadas por reacciones en la atmósfera, por procesos de nucleación generalmente producto de la reacción de gases presentes en la atmósfera y contaminantes precursores como el dióxido de nitrógeno (NO_2), dióxido de azufre (SO_2) y amoniaco (NH_4). En la Figura 2 se presenta de forma general el ciclo atmosférico de los aerosoles (Poschl, 2005).

Las partículas pueden ser eliminadas de la atmósfera a través de la deposición húmeda y seca, es decir a través de la precipitación en forma de lluvia de las gotas de agua presentes en las nubes; esto permite que las partículas en suspensión sean arrastradas nuevamente a la superficie. Por otra parte, la deposición seca se produce por fricción y es muy frecuente en ambientes urbanos.

Figura 2 Ciclo atmosférico de los aerosoles. Fuente: https://www.e-education.psu.edu/meteo300/node/671



Estudios previos realizados en el Área Metropolitana de Monterrey mostraron que las principales fuentes que contribuyeron a la emisión de partículas $PM_{2.5}$ primarias fueron las emisiones vehiculares, la actividad industrial y la quema de combustibles fósiles. (Martínez A et al, 2012). Este estudio empleó 60 muestras (filtros de cuarzo y teflón) utilizadas en equipos de bajo volumen con tiempos de muestreo de 24 horas. Las muestras colectadas fueron analizadas para la determinación de 16 elementos, aniones y cationes, carbono orgánico (CO) y carbono elemental (CE).

Los principales hallazgos del estudio hecho por Martínez et al. 2012, fueron que el calcio (Ca) presentó el promedio máximo de concentración en todas las muestras. Por otro lado el elemento de mayor abundancia en los filtros fue el CO (42%), seguido del sulfato (SO_4^{2-}) (23%), CE (7%), material de corteza (11%) y Nitratos (NO_3^-) (12%), que juntos representaron el 96% de los elementos detectados.

Por otro lado, con del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMA), se identificó el número de días que sobrepasaron los límites de PM_{10} y $PM_{2.5}$ para los años 2014, 2015 y 2016 los cuales se observan en Figura 3 **y** Figura 4

Figura 3 Días que sobrepasan los límites del promedio diario de PM_{10} en el AMM

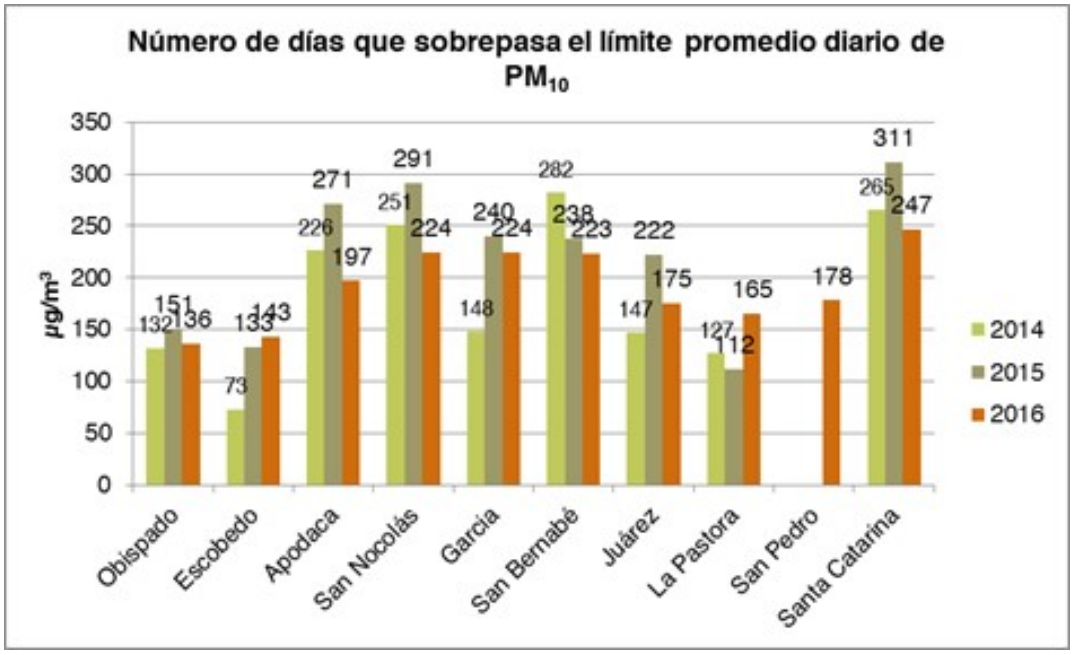
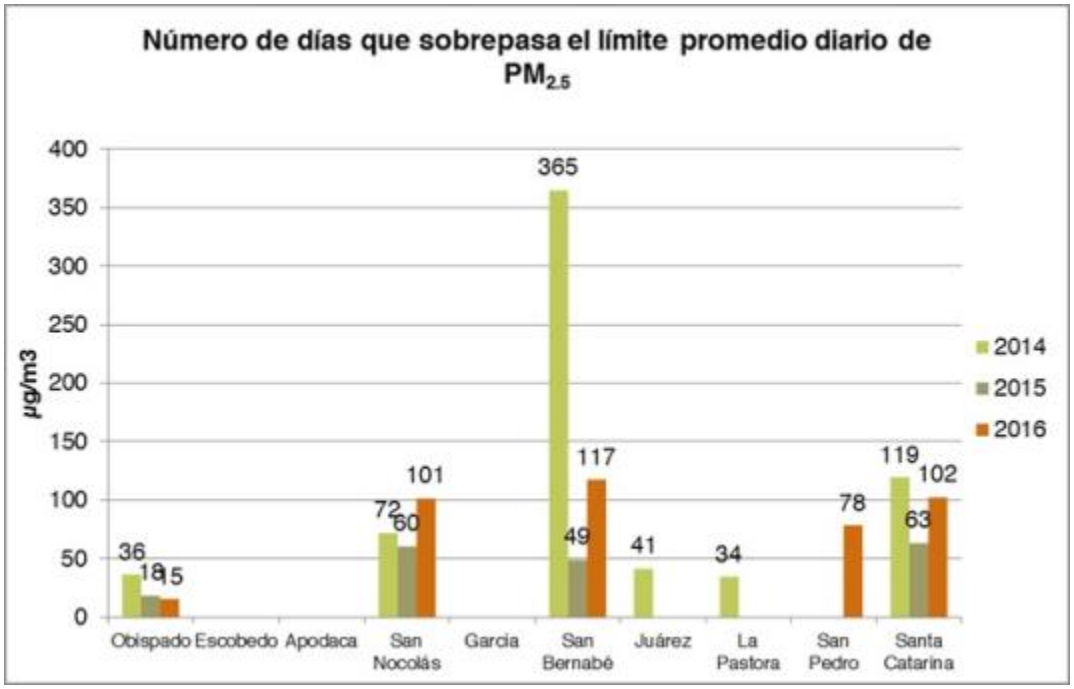


Figura 4 Días que sobrepasan los límites del promedio diario de $PM_{2.5}$ en el AMM



En términos generales se logró apreciar que el monitoreo realizado para PM_{10} fue más robusto y de mayor número de datos que el realizado para $PM_{2.5}$ donde claramente se observó deficiencias en el monitoreo que no permitió determinar para la mayor parte de las estaciones el número de días que sobrepasaron los límites establecidos en la norma NOM-025-SSA1-2014. En la Tabla 1 se resume el porcentaje de incumplimiento del número de días que sobrepasaron los límites del promedio diario para $PM_{2.5}$ y PM_{10}.

Tabla 1 Porcentaje de días que no cumplieron con los límites del promedio diario de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el AMM

Año	2014		2015		2016	
Parámetro	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$
Estación	2014	2014	2015	2015	2016	2016
Obispado	36.7	10.0	41.9	5.0	37.8	4.2
Escobedo	20.3	-	36.9	-	39.7	-
Apodaca	62.8	-	75.3	-	54.7	-
San Nicolás	69.7	20.0	80.8	16.7	62.2	28.1
García	41.1	-	66.7	-	62.2	-
San Bernabé	78.3	101.4	66.1	13.6	61.9	32.5
Juárez	40.8	11.4	61.7	-	48.6	-
La Pastora	35.3	9.4	31.1	-	45.8	-
San Pedro	-	-	-	-	49.4	21.7
Santa Catarina	73.6	33.1	86.4	17.5	68.6	28.3

Fuente: Elaboración propia con datos del SIMA

Observando de forma preliminar el número de días donde se sobrepasaron los límites de PM_{10} para promedio diario, más del 50% de los días no cumplieron con los estándares de la NOM-025-SSA1-2014 y peor aún, no se cuenta con la suficiencia de datos para la evaluación del cumplimiento de los límites para $PM_{2.5}$. Es claro que el monitoreo de partículas debe mejorar, tanto en la calidad de los datos reportados como en la expansión de la red de monitoreo. En el transcurso del presente documento se presentará los análisis de calidad del aire con énfasis en las partículas $PM_{2.5}$, el objetivo es determinar de forma preliminar las fuentes que más contribuyen y las medidas que podrían mejorar la calidad del aire en Monterrey y su área Metropolitana.

2. Objetivos

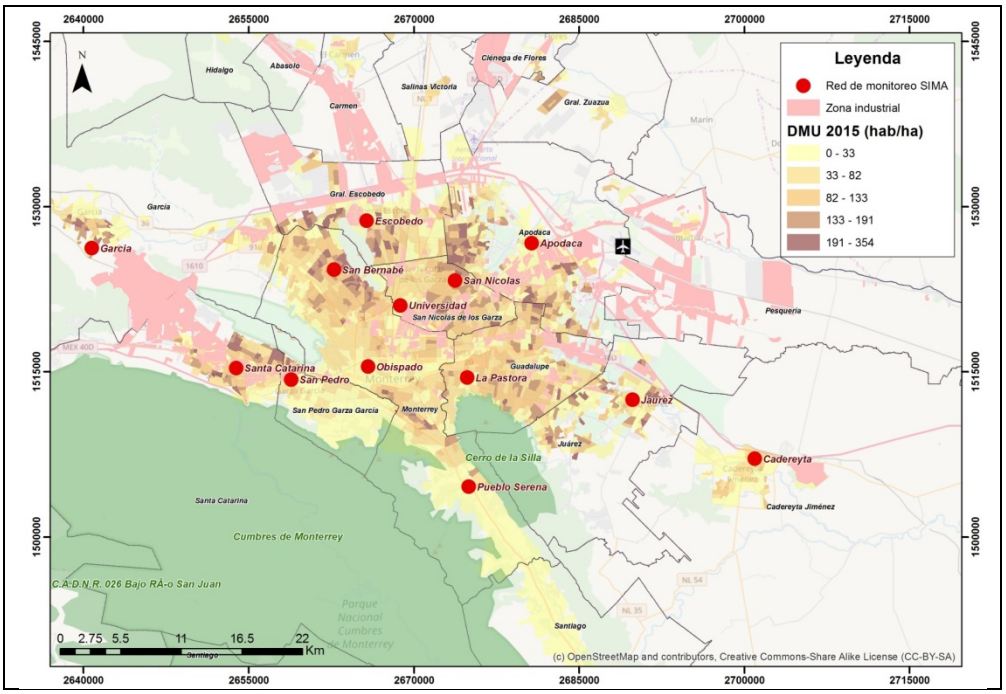
Analizar la problemática de la calidad del aire con respecto a partículas finas ($PM_{2.5}$) primarias y secundarias en la ciudad de Monterrey, Nuevo León, ya que presenta altas concentraciones de este contaminante, y reúne las condiciones que permitirán compilar información que pueda ser utilizada para evaluar y proponer medidas de reducción de emisiones directas y de sus precursores.

2.1 Resultados de estudios previos de $PM_{2.5}$ en el Área Metropolitana de Monterrey (AMM)

2.1.1 Antecedentes de calidad del aire

La red de monitoreo atmosférico para el Área Metropolitana de Monterrey inició operaciones en 1970 con una red manual de 12 equipos de alto volumen para PST. Esta primera red estuvo operando hasta 1992, año en que el Gobierno del Estado adquiere los componentes de una red automática de monitoreo atmosférico para cinco estaciones (Obispado, San Bernabé, San Nicolás, Santa Catarina y La Pastora) configuradas para la medición de bióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), ozono (O_3), partículas suspendidas finas y meteorología (ProAire 2016-2025). Actualmente el SINAICA, tiene registradas 13 estaciones de monitoreo en el AMM (ver Figura 5), incluyendo parámetros de CO, O_3, NO_x, SO_2, Partículas Menores a 10 micras (PM_{10}), Partículas Menores a 2.5 micras ($PM_{2.5}$), , Dirección del Viento (DV), Humedad Relativa (HR), Presión Barométrica (PB), Radiación Solar (RS), Precipitación (PP), Temperatura (TMP) y Velocidad de Viento (VV).

Figura 5 Distribución de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire en el Área Metropolitana de Monterrey (AMM) hasta abril de 2018. Fuente (http://sinaica.inecc.gob.mx/ Consulta 09 abril 2018)



2.1.2 Estudios de monitoreo de partículas en el AMM

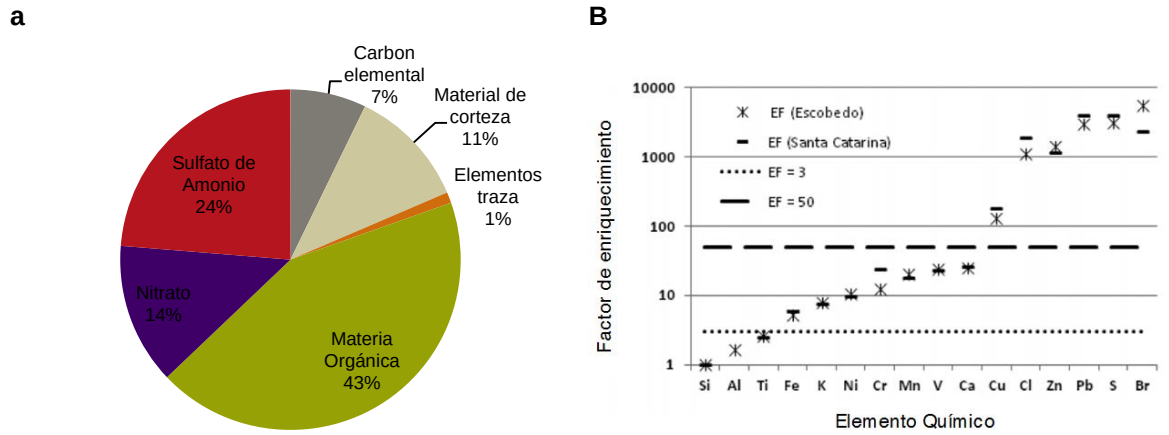
En términos del estudio de la calidad del aire asociados a PM_{10} y $PM_{2.5}$, en el AMM existen algunos trabajos de los años 90's, como es el inventario de emisiones 1995; y una tesis de maestría publicada por Cardona-Carrizalez (1999), en donde propone metodologías para estimar emisiones y dispersión de PM_{10} en el AMM ocupando factores de emisión para estimar la contribución por fuentes naturales y haciendo uso del modelo Gaussiano Industrial Source Complex Short Term 3 (ISCST3) para estimar contribución por PM_{10} en fuentes fijas, en este trabajo se menciona que en el periodo comprendido entre 1993-1998 se presentaron 217 días que excedieron la norma para PM_{10}. Cardona-Carrizalez recomienda que haga una buena georeferenciación de las pedreras en Santa Catarina para obtener mejores resultados de dispersión, así mismo, recomienda el uso de ISCST3, CALPUF, SCREEN3, CALINE para ejercicios de modelación en fuente fija. Otra investigación de tesis de maestría en el AMM, fue desarrollada por Sánchez-Martínez en 2006, enfocándose en el estudio de PM_{10} y $PM_{2.5}$ para tres estaciones del año 2005 (invierno, primavera-verano y otoño) en dos sitios de monitoreo (uno al sur de AMM y otro en Santa Catarina). En su trabajo se menciona que del año 2003 a 2005 se presentaron 68 excedencias a la norma de calidad del aire para PM_{10}; y la distribución de tamaño de partícula tuvo variaciones, pero en términos generales,

observaron que las partículas grandes representaron una mayor fracción en volumen pero una menor fracción en términos de cantidad. Así mismo, Sánchez-Martínez analizó la concentración y distribución de tamaño de partícula y algunos Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP's), encontrando para estos últimos concentraciones por debajo del límite de detección debido al muestreo insuficiente.

En el año de 2011, se desarrollaron una serie de mediciones en el AMM, conducida por González-Santiago et. al., 2011., con la finalidad de realizar un análisis temporal de PM_{10}; cuyos resultados demostraron que la zona suroeste (SO) de la AMM tuvo las concentraciones más altas de PM_{10} oscilando entre 66.83 a 158.9 $\mu g/m^3$, mientras que la zona menos contaminada por partículas fue la zona Sureste (SE) con concentraciones variando de los 43.1 a 90.8 $\mu g/m^3$. También encontraron que el invierno es la temporada del año con concentraciones más altas de esta especie, e incluso que el jueves y viernes son los días más contaminados, mientras que los domingos son los días menos contaminados. Con respecto a las horas en las que se encuentran las concentraciones más altas de partículas, se identificó el intervalo de tiempo entre las 08:00-10:00 horas.

Martínez et al., presentan un artículo científico en 2012, haciendo una caracterización química de $PM_{2.5}$, usando muestreadores de bajo volumen, colocados al noreste y sureste de la AMM; analizaron los filtros de teflón con un instrumento de florescencia de rayos X (XRF por sus siglas en inglés) y cromatografía iónica. Sus resultados demostraron que el calcio (Ca) es el elemento que más abundaba en las muestras, seguido por el azufre (S). Los resultados de desempeño de factor de análisis sobre 10 metales y Carbono Orgánicos (OC) y Carbono Elemental (EC), mostraron que hay 3 fuentes principales de $PM_{2.5}$: material crustal y escape de vehículos, actividad industrial y quema de combustóleo (Ver Figura 6).

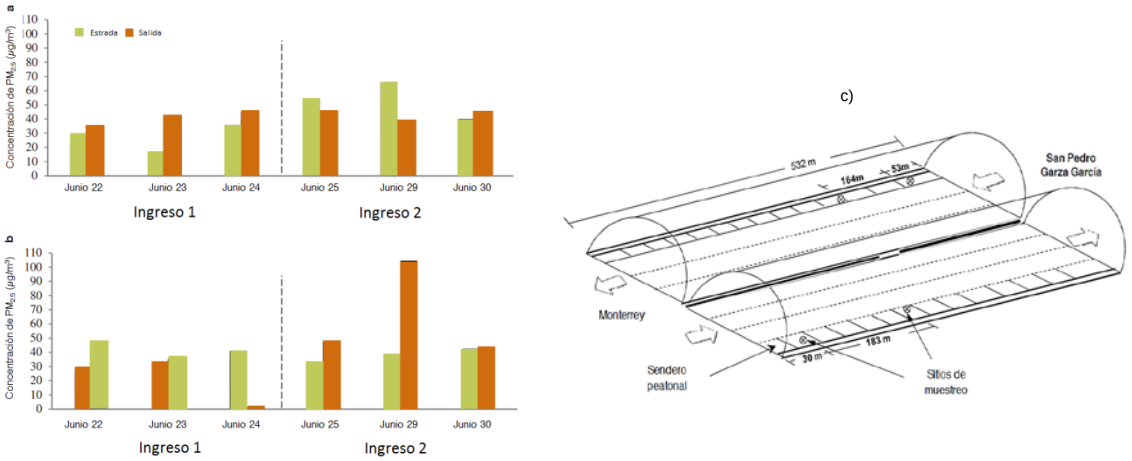
Figura 6 Contribución relativa de especies químicas en muestras de $PM_{2.5}$ colectadas entre Noviembre y diciembre de 2007. b) Factor de Enriquecimiento en los sitios de monitoreo Escobedo y Santa Catarina para muestras colectadas entre noviembre y diciembre de 2007. Fuente: Martínez et al. 2012.



Mancilla et al., 2012 realizaron mediciones en los escapes de los vehículos en circulación dentro de un túnel (Túnel de Loma Larga), para determinar factores de emisión en condiciones reales para $PM_{2.5}$, carbón orgánico (OC por sus siglas en inglés), carbono elemental (EC por sus siglas en inglés), metales traza (Na y Pb), cationes (Na^+, K^+, NH_4^+) y aniones (C^-, NO_3^-, SO_4^{2-}). Utilizaron muestreadores de alto volumen para partículas, colectando muestras de $PM_{2.5}$ cada 2.5 horas. Durante el estudio de Mancilla et al 2012, se contabilizó una flota vehicular de 108,569 vehículos que cruzaron el túnel con velocidades promedio de 43-76 km/h, de los cuales el 97% fueron vehículos a gasolina. Los promedios de tasas de emisión para $PM_{2.5}$, fueron de 22.8 ± 7.4 mg/ vehículo km y 187 ± 144 mg/L de esta especie. Las contribuciones de $PM_{2.5}$ por resuspensión de polvo en los factores de emisión fueron analizadas mediante el uso de silicón (Si) como marcador tipo y como principal componente de polvo fugitivo, estimando esta contribución en un 20-25%. Con respecto a las emisiones de metales traza provenientes de los frenos, mostraron perfiles diferentes cuando existía una pendiente de bajada con respecto a la pendiente de subida. A pesar de lo anterior, los factores de emisión para $PM_{2.5}$ no mostraron diferencia estadísticamente significativa bajo estos dos modos de manejo. Mancilla et al, 2012 mencionan que esto se pudo deber a la cancelación de las contribuciones entre especies que son emitidas preferentemente durante ambos modos de manejo, cuesta abajo (mas especies de metálicas y menos OC y EC) y cuesta arriba (mas OC y EC y menos metales). Las emisiones vehiculares de $PM_{2.5}$ fueron dominadas principalmente por especies de OC y EC, representando 55.2 ± 2.8% y 16.3 ± 1.6% del total de la masa emitida considerando las correcciones. La relación de OC/EC fue de 2.85 ± 0.79 y 1.19 ± 0.65 para condiciones de tráfico abundante y trafico moderado, respectivamente. Los resultados obtenidos cuadran

con otros estudios en túneles y pueden ser complementarios a los resultados obtenidos con otras técnicas que resulten en un mejor inventario de emisiones de la AMM. (Ver Figura 7)

Figura 7 Mediciones de metales pesados determinados en $PM_{2.5}$ dentro del Túnel Loma Larga realizado en Monterrey para el año 2006. a) Concentraciones másicas cuando existió tráfico pesado b) Cuando el tráfico fue moderado. c) Esquema del Túnel Loma Larga y posición de los muestreadores. Fuente: Mancilla et al, 2012.



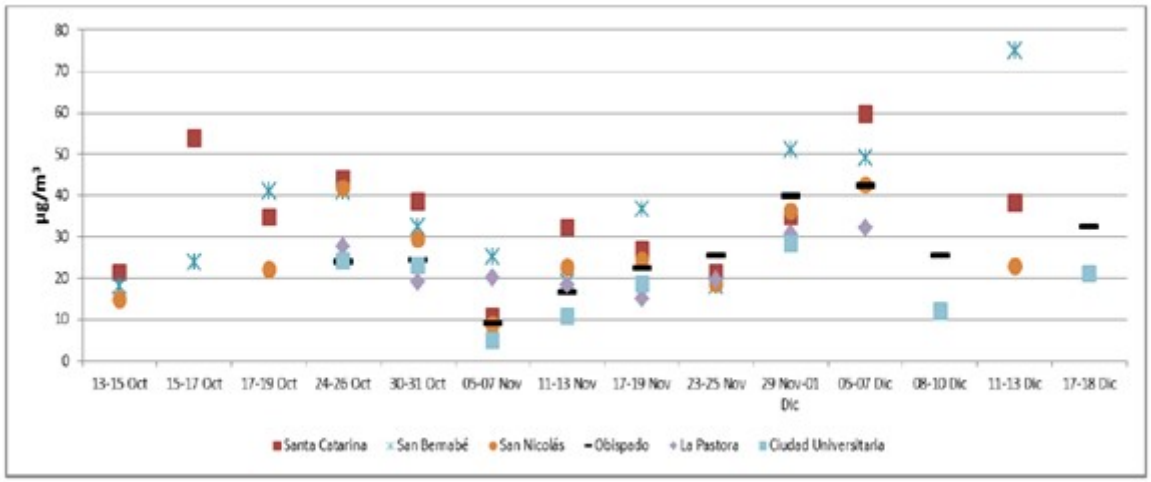
Por su parte, Mancilla et al. 2015, realizaron investigaciones para conocer la variación temporal y estacional de $PM_{2.5}$ y la contribución de aerosoles secundarios orgánicos en muestras colectadas en primavera y otoño de 2011 y 2012; encontrando que las concentraciones diurnas de $PM_{2.5}$ mostraron ser 20% mayores que en la noche, y que las especies carbonosas se mantuvieron alrededor de 28-49% en primavera y 46-55% en otoño. Así mismo, encontraron una fuerte correlación entre carbón orgánico y carbón elemental, sugiriendo fuentes similares de emisión y pobres correlaciones con la contribución de Aerosoles Orgánicos Secundarios (SOA por sus siglas en inglés).

Blanco-Jiménez et al. 2015, presentan un informe de resultados por parte del INECC, en donde evalúan la presencia de $PM_{2.5}$ en el AMM, y cuyo objetivo es caracterizar y cuantificar los componentes químicos presentes en la $PM_{2.5}$ y su asociación con fuentes de emisión potenciales que a su vez sirviera para desarrollar las capacidades locales de muestreo experimental (Universidad Autónoma de Nuevo León e Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey) de esa especie mediante una campaña de mediciones intermitentes de octubre de 2014 a marzo de 2015. Para este fin Blanco-Jiménez et al., 2015, eligieron los sitios de la red de monitoreo de esta región, identificados como Santa Catarina, San Bernabé, San Nicolás, Obispado, La Pastora y Ciudad Universitaria (siendo los tres primeros sitos aquellos que históricamente presentan concentraciones más altas de $PM_{2.5}$ de acuerdo con un análisis de datos de esta red para los años 2000-2009). Utilizaron 2

muestreadores por sitio, de bajo volumen de la marca AirMetrics, a un flujo de 5 litros por minuto durante 48 horas continuas. Así mismo ocuparon muestreadores de flujo intermedio (30 Litros por minuto) de la marca Slit Jet Air Sampler, los cuales operaron durante 24 horas.

La especiación química de las $PM_{2.5}$ que Blanco-Jiménez et al 2015 encontró del 13 de Octubre al 18 de Diciembre de 2014, utilizando Minivol, indicaron que Santa Catarina y San Bernabé fueron los sitios con concentraciones másicas más altas con promedios de 35 µg/m^3 y 36 µg/m^3 respectivamente. Los sitios que rebasaron la NOM-025-SSA1-2014[1] (límite máximo permisible de 24 horas = 45 µg/m^3 de $PM_{2.5}$) es Santa Catarina en dos ocasiones y San Bernabé en tres ocasiones. **(**Figura 8**)**

Figura 8 Distribución espacial de la concentración de $PM_{2.5}$ en el AMM desarrollado por Blanco-Jiménez et al. 2015, obtenidos con muestreadores Minivol en el periodo comprendido de Octubre-Diciembre 2014. Fuente: Blanco-Jiménez et al. 2015

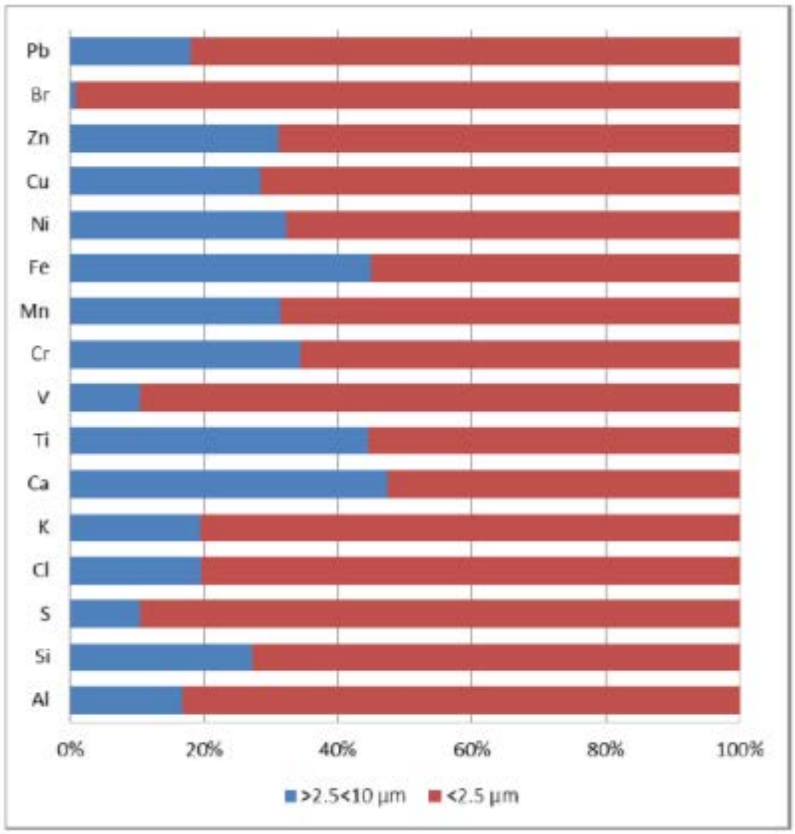


En este mismo estudio Blanco-Jiménez et al 2015, presenta resultados de resultados obtenidos de la composición elemental de las fracciones gruesa y fina, en donde se observa que en las partículas respirables $PM_{2.5}$ se encuentran presentes todos los elementos desde el Al hasta el Pb, los cuales provienen del suelo (Al, Si, Ca, Fe, Ti, K) como de las emisiones vehiculares e industriales, con excepción de Ca y Ti y de las partículas enriquecidas de Fe, los cuales se encuentran presentes en proporciones casi equivalente, tanto en la fracción gruesa, como en la fracción fina de las partículas respirables PM_{10}, así mismo, el Pb, Br, V,

[1] **NOM-025-SSA1-2014.** Salud ambiental. Valores límite permisible para la concentración de partículas suspendidas PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el aire ambiente y criterios para su evaluación. (Valores para PM_{10} = 75 µg/m^3, promedio 24 horas y 40 µg/m^3, promedio anual; Valores para $PM_{2.5}$= 45 µg/m^3, promedio 24 horas y 12 µg/m^3, promedio anual)

K, Cl, S y Al son los elementos que se encuentran en mayor proporción en $PM_{2.5}$ con un valor mayor al 80%. (Ver Figura 9).

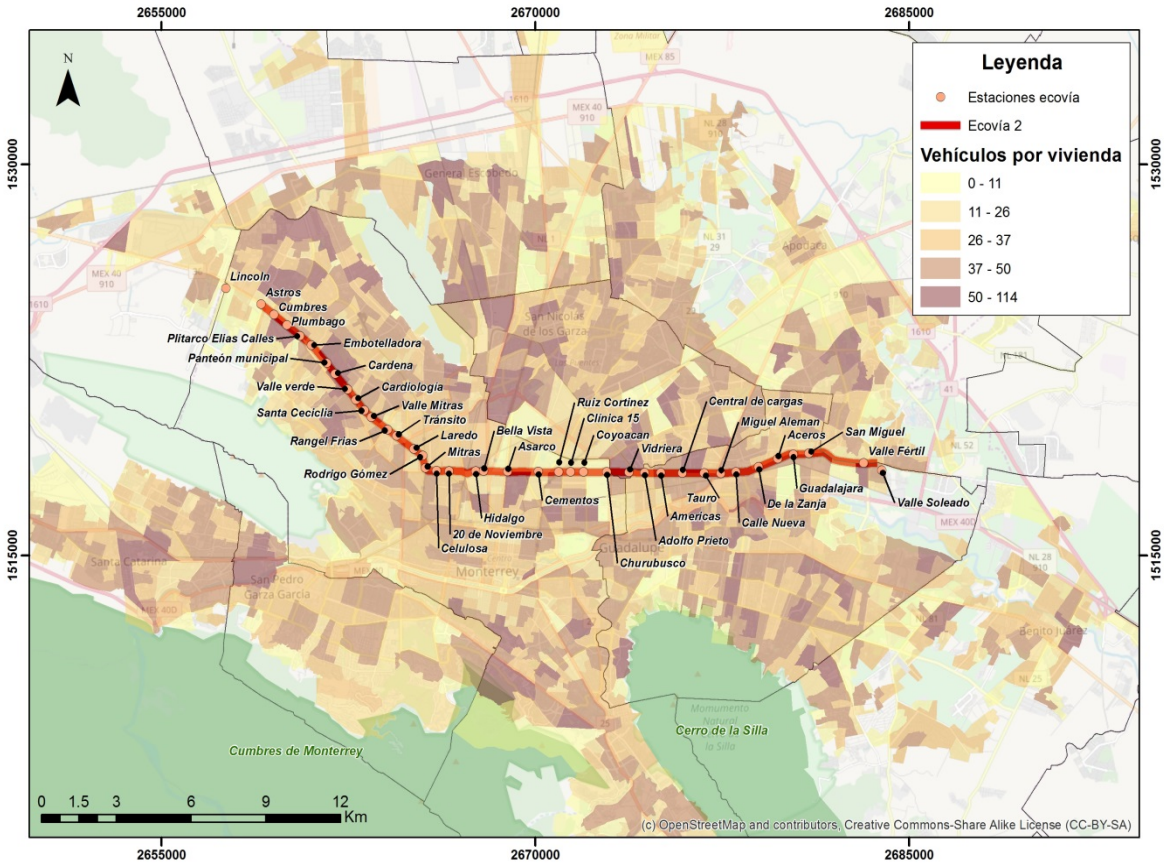
Figura 9 Composición elemental de las fracciones gruesa (>2.5<10 µm) y fina (<2.5 µm) de los muestreos de PM_{10} con equipo Slit Jet Air Sampler, localizado en Obispado del 16 de diciembre de 2014 al 14 de marzo de 2015. Fuente: Blanco-Jiménez et al. 2015.



Con respecto a estudios relacionados con concentraciones de contaminantes atmosféricos generados por fuentes móviles en Monterrey, el INECC-2015, realizó una serie de mediciones cuyo objetivo fue determinar las concentraciones de CO, $PM_{2.5}$, benceno, tolueno, etilbenceno y xileno (BTEX) a las que están expuestos los usuarios de la Ecovía —sistema de autobús de tránsito rápido— que circula por el Corredor Ruiz Cortines – Lincoln del Área Metropolitana de Monterrey, cuya longitud es de 30.1 km y cuenta con 41 estaciones, construida sobre el corredor Lincoln-Ruiz Cortínez— y un auto particular, realizando recorridos completos (ida y vuelta) de la estación Lincoln hasta valle soleado, así como, en un punto fijo a nivel banqueta en las inmediaciones de la estación Asarco en el cruce de las avenidas Guerrero y Ruíz Cortínez (ver Figura 10), durante 8 días a partir del 14 hasta el 21 de abril de 2015.

Las mediciones se llevaron a cabo en los horarios de mayor demanda de transporte público (7:30 a 9:30 y de 18:00 a 21:00 horas).

Figura 10 Mapa de localización del recorrido realizado por las unidades de la Ecovía. Fuente: INECC-2015



Las mediciones se llevaron a cabo mediante un grupo de técnicos a quienes se les proporcionaron los analizadores y muestreadores, (Langan modelo T15 para CO, muestreadores personales marca MSP-Corp, modelo 200 acoplados a bombas SKC de 4 L/min para $PM_{2.5}$ y canister para BTX quienes los portaron (11), cerca del área respiratoria, mientras simulan ser usuarios de la Ecovía y realizaban el recorrido completo, Valle soleado—Lincoln—Valle soleado, sentándose en la parte media del autobús.

Figura 11 Equipos de monitoreo atmosférico utilizados durante el proyecto de "Estudio de Impacto por exposición a contaminantes generados por fuentes móviles que circulan en el corredor Ruiz Cortines - Lincoln. Segunda etapa" a) Monitor marca Langan modelo T15, para CO, b) Bomba de succión marca SKC, modelo 224-PCXR8 para monitoreo de $PM_{2.5}$, y c) Canister para muestreo de BTX.

a) **b)** **c)**

Los resultados que encontrados por INECC-2015 demostraron que las concentraciones de CO, $PM_{2.5}$ y BTX del transporte público Ecovía, fueron menores que sus correspondientes comparaciones contra un auto circulando por la misma ruta, y contra un punto fijo, así como se muestra en la Figura 12.

Algunas de las conclusiones que se mencionan en INECC-2015, se refieren a que la implementación de corredores BRT —como lo es la Ecovía— permiten reducir las concentraciones de algunos contaminantes y los tiempos de exposición, de los usuarios de este tipo de transporte público. Y que la presencia de $PM_{2.5}$ y tolueno en las mediciones pueden estar asociados a las fuentes presentes a lo largo del corredor Ruiz Cortines-Lincoln y el uso de sistemas de aire acondicionado en las unidades de la Ecovía.

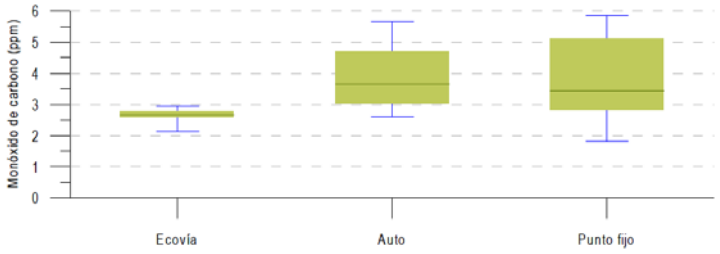
Con respecto a información oficial emitida por el Estado de Nuevo León, se publicó el ProAire para el Área Metropolitana de Monterrey 2008-2012**,** el cual menciona la excedencia a las normas horarias y anuales de PM_{10} y $PM_{2.5}$ [2] en el periodo de 2004 a 2007, sugiriendo aplicar medidas de control con la industria pedrera de la región. El ProAire del Estado de Nuevo León 2016-2025, muestra que los días con calidad del aire mala de acuerdo a la norma de PM_{10} (promedio 24h) en las estaciones de su red de monitoreo (10 estaciones) fueron en promedio 115 días para el año de 2014, y aproximadamente 13 días para $PM_{2.5}$ en 8 estaciones de monitoreo operando el mismo año. También se menciona que el inventario de emisiones a la atmósfera 2013, identifica que la *extracción-beneficio*[3] *de minerales no metálicos* contribuye con el 10.4% y 14.3% (2,614 y 1,608.2 Mg/año); la *actividad petróleo-petroquímica* 6.6% y 13.3% (1,651.1 y 1,502.2 Mg/año); y *la generación de energía*

[3] El término "beneficio" o refinamiento, se refiere al proceso o conjunto de procesos por el cual o cuales se separan la mena y la ganga (conjunto de todos los minerales sobrantes que se encuentran asociados a la mena en la roca extraída en un yacimiento)

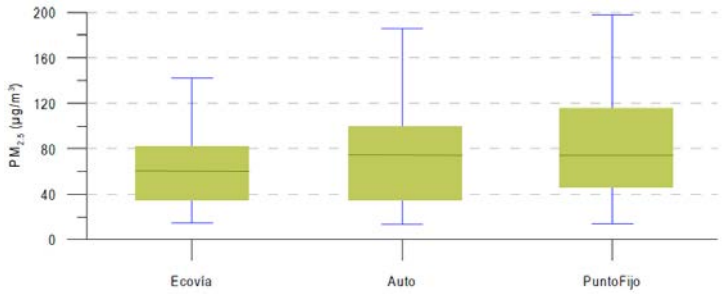
eléctrica contribuye con 5.6% y 12.3% (1,418.1 y 1,389.8 Mg/año) de PM_{10} y $PM_{2.5}$ respectivamente, con respecto al total emitido en el Estado, considerando a la categoría de fuentes fijas “la fuente más importante” (después de las fuentes de área) con un aporte del 31% y 53.7% del total del Nuevo León.

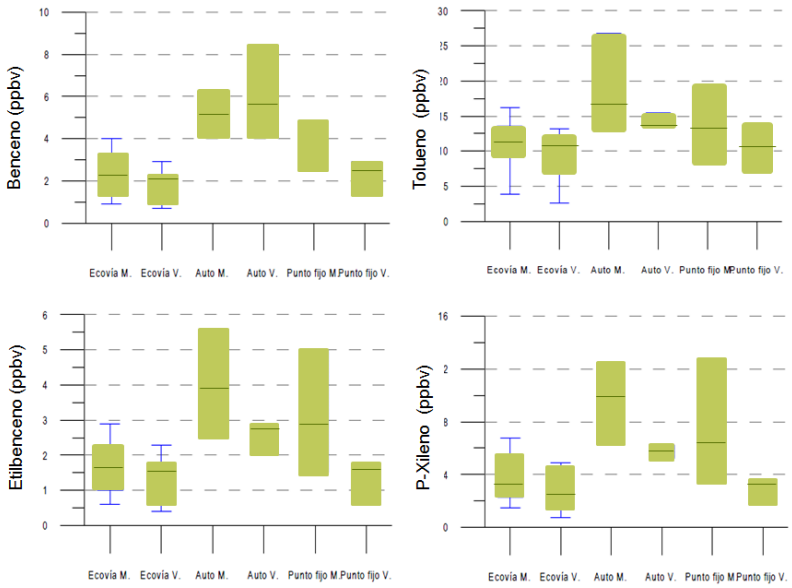
Figura 12 Concentraciones de CO determinadas en los tres microambientes considerados en la campaña de mediciones de INECC-2015 b) Concentraciones de $PM_{2.5}$ determinadas al interior de las unidades de la Ecovía y vehículos particulares, y en las inmediaciones de la estación Asarco, ubicada en el cruce de las avenidas Guerrero y Ruíz Cortínez de la campaña INECC-2015, y c) Concentraciones de BTEX (ppb_V) determinadas en los distintos microambientes considerados durante la campaña INECC-2015.

a



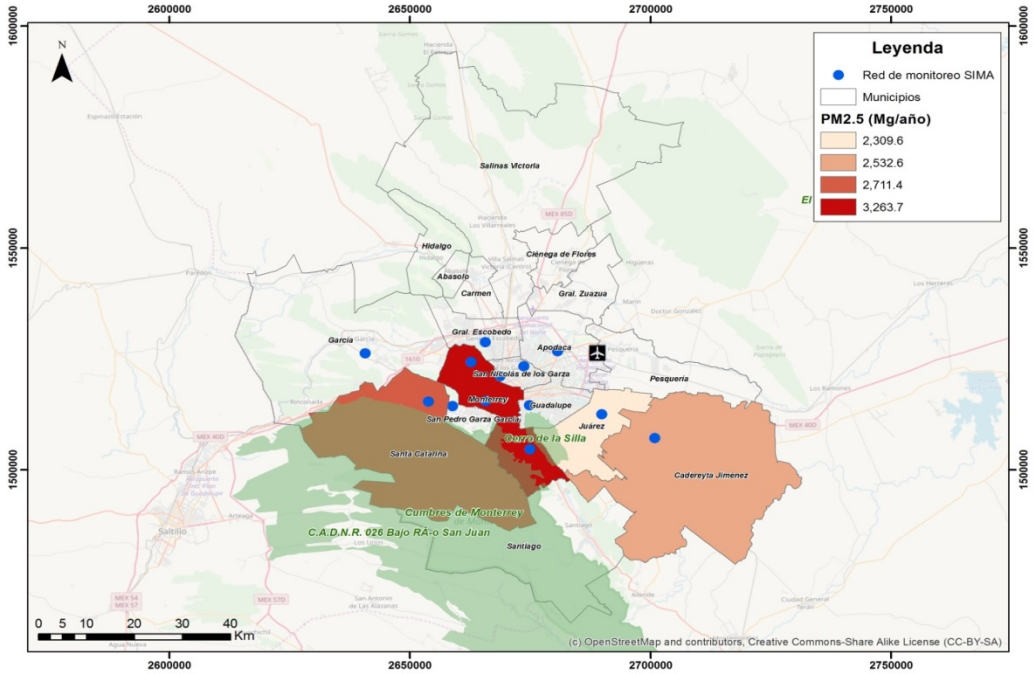
b





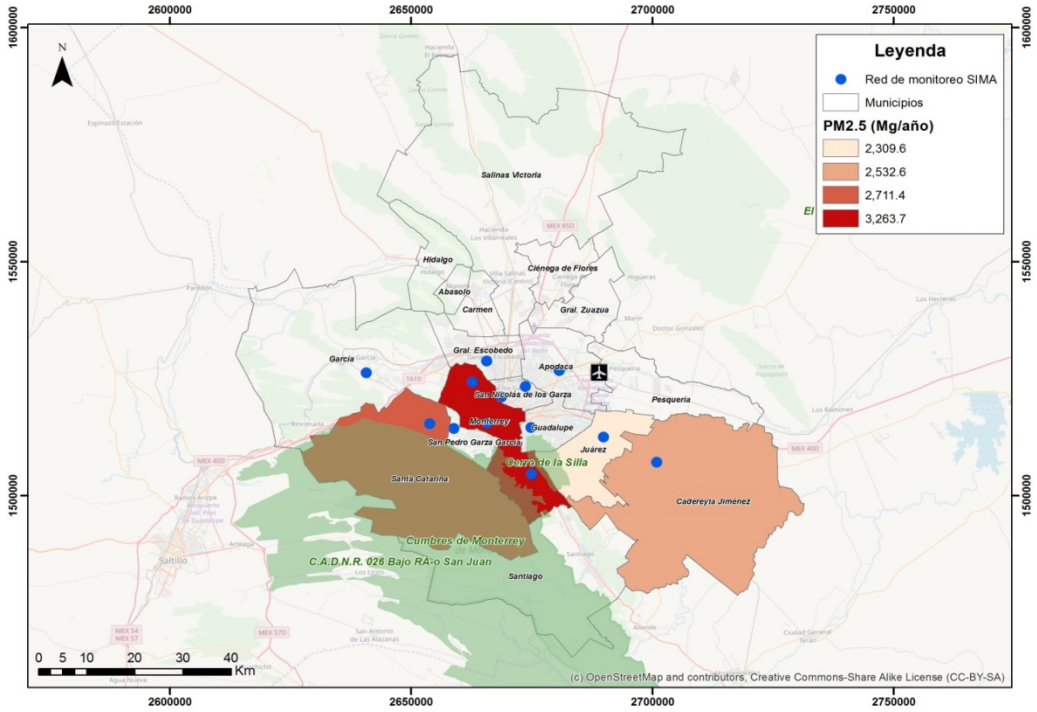
También se menciona que los municipios de Nuevo León que más contribuyen con emisiones de PM_{10} son: a) Monterrey (13%) cuyas fuentes fijas son industria del vidrio, generación de energía eléctrica e industria de accesorios, equipos y aparatos de generación eléctrica; b) Santa Catarina (10.8%) debido a extracción y beneficio de minerales no metálicos e industria de accesorios, equipos y aparatos de generación eléctrica; c) Juárez (9.2%) debido a minerales no metálicos (Figura 13).

Figura 13 Municipios que tienen una mayor contribución de PM_{10} en Área Metropolitana de Monterrey (AMM) de acuerdo a ProAire del Estado de Nuevo León 2016-2025, (Cuadro 6 ProAire 2016-2025)



Para el caso de $PM_{2.5}$, los municipios que contribuyen mayoritariamente con emisiones son: a) Cadereyta de Jiménez (16.1%) debido a la industria del petróleo y petroquímica; b) Santa Catarina (11.7%) debido a la extracción-beneficio de minerales no metálicos e industria de accesorios, equipos y aparatos de generación eléctrica. c) Pesquería (11%) proveniente de la generación de energía eléctrica; y d) García (10.8%) asociado a la extracción-beneficio de minerales no metálicos, generación de energía eléctrica, industria automotriz, industria del cemento y cal, industria metalurgia e industria química. (Ver Figura 14)

Figura 14 Municipios que tienen una mayor contribución de $PM_{2.5}$ en Área Metropolitana de Monterrey (AMM) de acuerdo a ProAire del Estado de Nuevo León 2016-2025(Cuadro 7 ProAire 2016-2025)



Con respecto a las diecisiete medidas de control de emisiones mencionadas en el ProAire Nuevo León 2016-2025, cinco de ellas están relacionadas directamente con el control de emisiones en fuentes fijas dentro de la estrategia 1, las cuales son:

1) "*Fortalecer la regulación de las fuentes fijas estatales*", mediante la mejora de instrumentos de gestión y aplicando el programa de inspección y vigilancia (integrar licencias de funcionamiento, cédulas de operación anual, entre otras). Ese sistema permitirá mantener actualizado el padrón e identificar fuentes fijas con mayores emisiones para exigir el cumplimiento a los Límites Máximos Permisibles (LMP) de la normatividad vigente.

2) "*Implementar el programa de reducción de emisiones a la atmósfera en fuentes fijas prioritarias del Estado de Nuevo León*", Dirigir el programa de reducción de emisiones a la atmósfera hacia la industria petroquímica, química, metalúrgica, cemento y cal, vidrio, entro otros. El ProAire 2016-2025 menciona que el problema principal de calidad del aire en AMM se debe a PM_{10}, O_3 y $PM_{2.5}$

3) "*Reducir las emisiones a la atmósfera generadas por el aprovechamiento de recursos minerales y sustancias no reservadas a la federación*", Se considera reformar la Ley Ambiental de Estado de Nuevo León y su Reglamento, incrementando el número de establecimientos regulados también conocidos como "Pedreras" y que cumplan con la Normatividad Ambiental Estatal. Con

esto se considera obtener las cantidades que emiten las pedreras y en consecuencia una regulación eficiente, ya que esta actividad de extracción se realiza a cielo abierto.

4) "*Prevención y control de emisiones a la atmósfera provenientes del sector petróleo y petroquímica*", Mantener emisiones reducidas, principalmente de SO_2 y partículas provenientes de la refinería "Ing. Héctor R. Lara Sosa", sustituyendo el combustóleo por gas natural en un 87% para su uso en calderas y calentadores (5 calderas para generación de vapor y 34 calentadores). La capacidad de la refinería es capacidad de refinación es de 275,000 barriles de petróleo por día. También realizar mantenimiento preventivo y correctivo en calentadores y calderas para cumplir con la NOM-085-SEMARNAT-2011.

5) "*Desarrollar e implementar el plan de reducción de emisiones de las fuentes fijas de jurisdicción federal del Estado de Nuevo León*" Esta medida está dirigida al sector de la industria federal como son: petróleo y petroquímica, química, metalúrgica, cemento y cal, entre otros.

El resto de medidas mencionadas en el ProAire 2016-2025 están dirigidas hacia fuentes móviles, fuentes de área, protección a la salud, comunicación y educación ambiental, fortalecimiento institucional y financiamiento.

En términos de carbono negro se han desarrollado algunas campañas de medición como lo hizo López-Reyes et al., 2016, encontrando concentraciones de partículas suspendidas de aproximadamente 96.0 $\pm$34.8 µg/m^3 colectadas en los meses de septiembre a octubre de 2012; y mediante el uso de microscopio electrónico de barrido (SEM por sus siglas en inglés) encontraron concentraciones de carbono negro de aproximadamente 1.6 $\pm$0.3 µg/m^3, en un intervalo de partícula de 0.5-10.0 µm.

En algunos estudios más recientes publicados en 2016 por González et al. 2016, se hace referencia al estudio a la caracterización química y morfológica de partículas suspendidas totales (PST) y $PM_{2.5}$ usando difracción de rayos X (XRD por sus siglas en inglés) y Espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS por sus siglas en inglés) y SEM, mostrando que las principales compuestos son de origen cristalino como el $CaCO_3$ y SiO_2 para las PST; y en el caso de las $PM_{2.5}$ se encontró $CaSO_4$ (Figura 15 y Figura 16) Sugiriendo que el origen de estos componentes puede ser emitido por la industria local de la construcción y la explotación de depósitos ricos en calcita; y la presencia de SiO_2 se debe a la resuspensión de material geológico abundante en la región. En este mismo año se publicó un artículo referente a las concentraciones de $PM_{2.5}$ muestreados en verano acoplando los resultados a un modelo de Balance Químico de Masa (CMB por sus

siglas en inglés) para determinar la distribución de fuentes de emisión en la región, encontrando que las actividades industriales, el tráfico y las actividades de combustión son las fuentes más grandes de $PM_{2.5}$ primario y gases precursores de aerosoles secundarios orgánicos e inorgánicos (SO_2, NOx, NH_3 y COV). También encontraron que el carbono negro y el carbono orgánico son componentes importantes de la $PM_{2.5}$ en el AMM. Mencionan que hay consistencia con el Inventario de emisiones de la AMM en términos de que las mayores fuentes de partículas y SO_2 se deben a la refinación y combustión de combustóleo, así como, óxidos de nitrógeno y amonio, se deben a transporte y actividades industriales, y el amonio se debe a la agricultura en el estado.

Figura 15 Micrografía de partículas colectadas en a) Estación Obispado, b) Estación San Nicolás, c) partícula basada en Carbono con superficie suavizada d) partícula rica en carbono con gran superficie porosa. Fuente: González et al. 2016

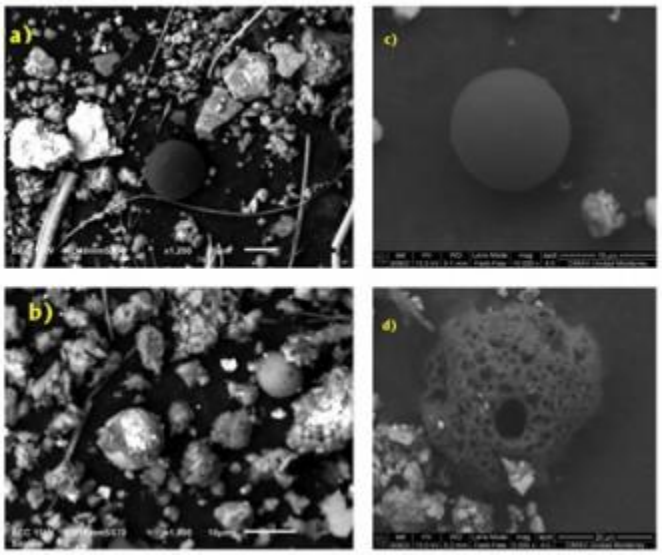
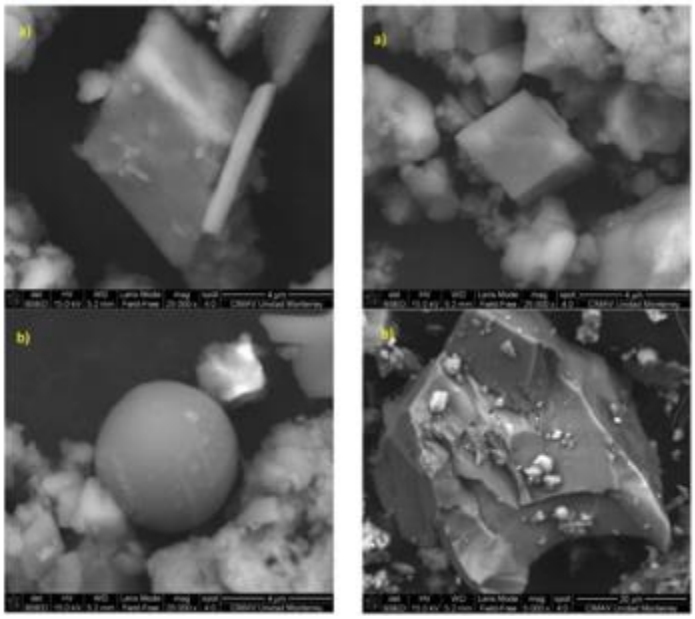


Figura 16 Izquierdo a) y b) Micrografía de partículas ricas en Si y O, partículas colectadas de una muestra de Partículas Suspendidas Totales. Derecha a) y b).

Micrografía de partículas ricas en C, Ca y O, partículas colectadas de una muestra de Partículas Suspendidas Totales. Fuente: González et al. 2016.



En el año 2017 González et al., publicaron un artículo en donde realizaron muestreo de PST y $PM_{2.5}$ en el AMM durante junio – septiembre de 2015 y analizaron las muestras mediante XPS, ICP-AES y SEM-EDS, obteniendo que los elementos más abundantes en PST fueron Fe, Cu y Zn; mientras que el elemento más abundante fue Cd en las $PM_{2.5}$. En la superficie los elementos más abundantes fueron Al, Ca y Na. Con respecto a las concentraciones más altas de Pb, se localizaron cerca de zonas industriales asociadas con la industria del vidrio y cerámica, con la quema de combustóleo en termoeléctricas y con la producción de baterías de automóviles a base de plomo. El Zn y Cu se presentaron en zonas con fuerte influencia vehicular.

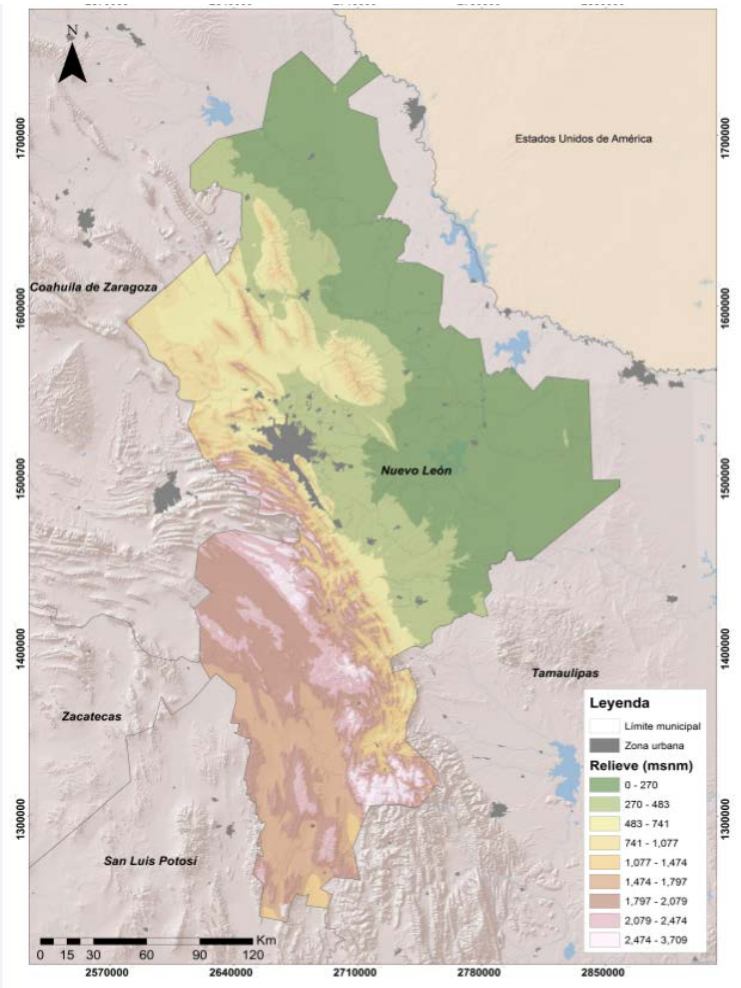
3. Meteorología

De la meteorología depende la rapidez con la que los contaminantes emitidos se dispersan, transportan y reaccionan en una cuenca atmosférica. Los factores meteorológicos son la temperatura, nubosidad, vientos, humedad, visibilidad horizontal, tipo y cantidad de precipitación y presión atmosférica.

3.1 Relieve

La Altiplanicie Mexicana y la Sierra Madre Oriental cruzan el estado de noroeste a sureste. La sierra presenta altitudes inferiores a los 3,500 m; el Altiplano, entre los 1,500 y 2,000 metros de altitud. Hacia la llanura costera se desciende por el oriente de la sierra en forma gradual hasta los límites con Tamaulipas. En el Estado de Nuevo León, se puede encontrar el cerro de la Silla el cual tiene una elevación de 1,800 msnm en la ciudad de Monterrey. Hacia la zona sur, se puede encontrar una serie de sierras, en donde se encuentra el cerro El Morro con 3,710 m.s.n.m. Al norte del Estado se observan extensos lomeríos interrumpidos por algunas sierras aisladas que forman valles entre las serranías. Al lado este, en los límites con el estado de Tamaulipas, se localiza la llanura conocida como Anáhuac, cuya altura más baja es de 10 m.s.n.m.

Figura 17 Relieve del estado de Nuevo León. Fuente: (INEGI, 2018)



3.2 Temperatura

El AMM presenta climas extremosos con oscilaciones térmicas mayores a 40°C. El patrón climático va de este a oeste con cambios graduales de temperatura y precipitación en el orden semicálido, semiseco, seco y muy seco.

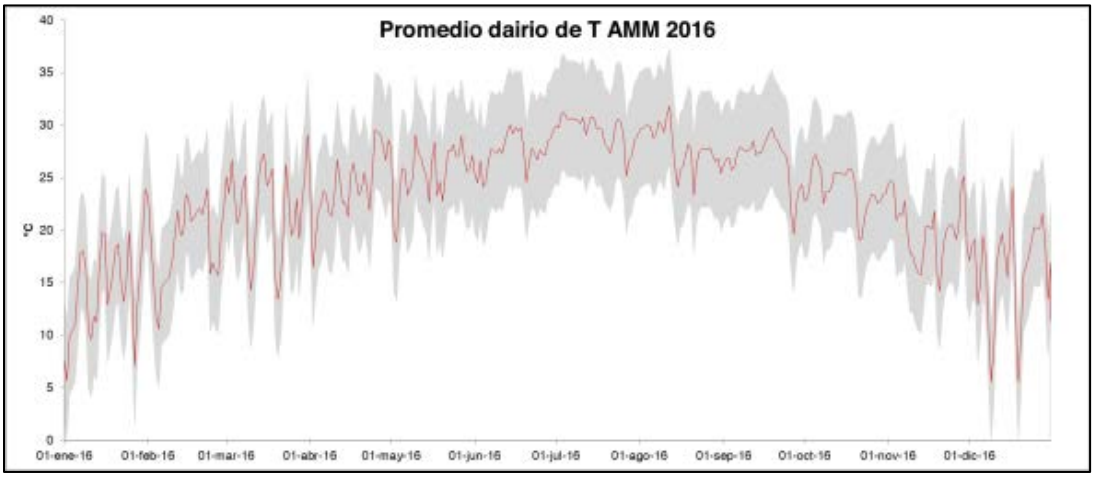
A continuación se detalla los promedios estadísticos de temperatura para cada una de las estaciones de la red de monitoreo de calidad del aire de Monterrey por estación y promedio global.

La temperatura promedio anual (2014, 2015,2016) del Área Metropolitana de Monterrey a partir de los datos validados de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico fue de 22.20°C. Las estaciones que presentaron las temperaturas más altas fueron la Estación Norte, Noroeste2 Y Sureste2 con valores aproximados a los

41°C. La temperatura mínima se registró en la estación Suroeste con un valor de -1.75 °C el 29 de enero del año 2014. Los meses más cálidos fueron julio y agosto con un promedio de 28.63 °C mientras que el mes más frío fue el de enero con un promedio mensual de 13.42 °C. La Figura 18 muestra el promedio diario mensual para la Ciudad de Monterrey y su Área Metropolitana.

El año que presentó el mayor promedio de temperatura mensual fue el mes de junio de 2016 con 27°C, por otro lado, durante el mes de enero de 2015 se reportó la temperatura más baja de los tres años con un valor de 12°C.

Figura 18 Serie de tiempo del promedio diario de la temperatura del aire utilizando los datos de la Red de Monitoreo Atmosférico del Área Metropolitana de Monterrey. La línea roja corresponde al promedio diario calculado a partir de los registros de todos los sitios de monitoreo, el área sombreada en gris corresponde a una desviación estándar del promedio diario. (Elaboración propia con datos de la Red Automática de Monitoreo de Monterrey, 2018)

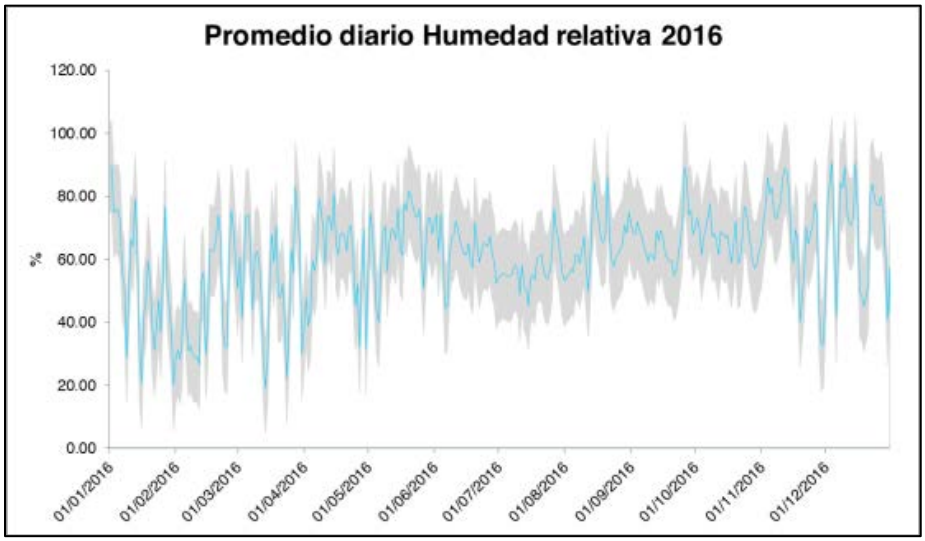


En lo referente a los valores de temperaturas por tipo de suelo, las estaciones ubicadas en zonas urbanas presentaron un promedio de 22.32°C, mientras que las estaciones ubicadas en zonas rurales presentaron un promedio de 22.17°C. Los efectos de la isla de calor urbana se observaron en aquellas estaciones ubicadas dentro del entorno urbanizado. La urbanización provoca que las ciudades experimenten temperaturas mayores que las del campo circundante, (Jáuregui, 1997) con implicaciones en el clima regional, la formación de ozono troposférico y otros contaminantes secundarios, además de las afectaciones en el transporte de contaminantes (Yoshikado y Tsuchida, 1996; Gray y Finster, 2000, Jazcilevich et al, 2002).

3.3 Humedad relativa y precipitación

De acuerdo al ProAire, la humedad regional es alta en los meses de mayo a octubre, lo cual es característico de la temporada de lluvias. Durante el año 2016, los periodos de mayor humedad se registraron en los meses de Octubre a Diciembre. Cabe resaltar que el promedio de humedad relativa del año 2016 (61.36%) fue la más baja en comparación con los promedios del año 2014 (65.08%) y 2015 (68.30%). (Figura 19)

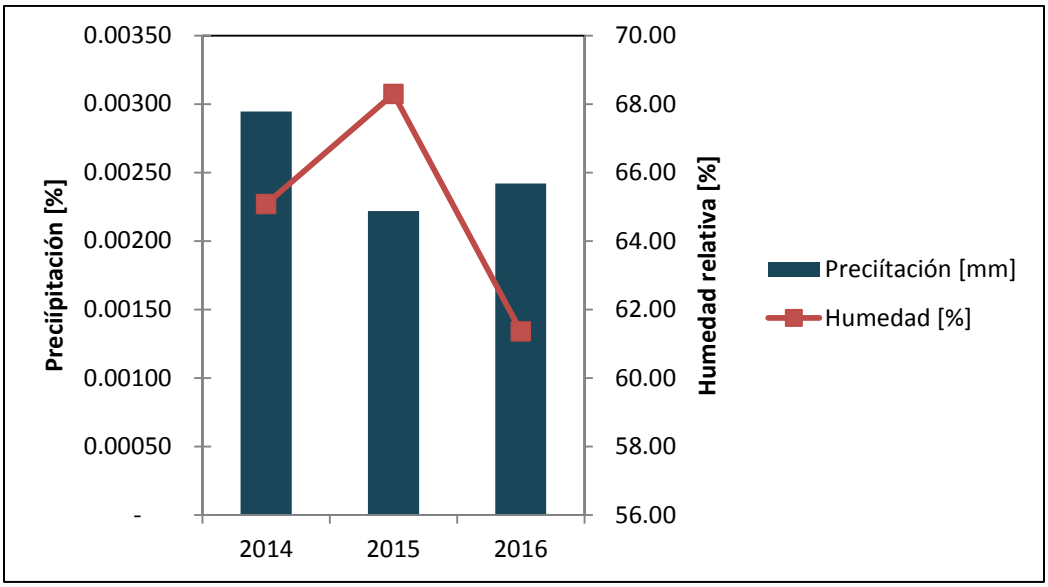
Figura 19 Serie de tiempo de la humedad relativa del Área Metropolitana de Monterrey 2016. La línea azul corresponde al promedio diario calculado a partir de los registros de todos los sitios de monitoreo, el área sombreada en gris corresponde a una desviación estándar del promedio diario.



El valor más alto de humedad reportado en el año 2016 se presentó el día 15 de Diciembre de 2016, mientras que el valor más bajo se reportó el 14 de marzo.

Durante los años 2014,2015 y 2016, la Red de Monitoreo del AMM, estuvo equipada con sensores continuos de precipitación pluvial que permitió realizar un seguimiento de la lluvia a lo largo del año. La precipitación pluvial es reportada en milímetros (mm) de lluvia. El promedio reportado para el año 2016 fue de 0.0024201 mm; el valor más alto se presentó el día 15 de septiembre del año 2016 con 0.11 mm, mientras que el valor más bajo se dio en el mes de Febrero. (Calidad del Aire en la Ciudad de México, 2016)

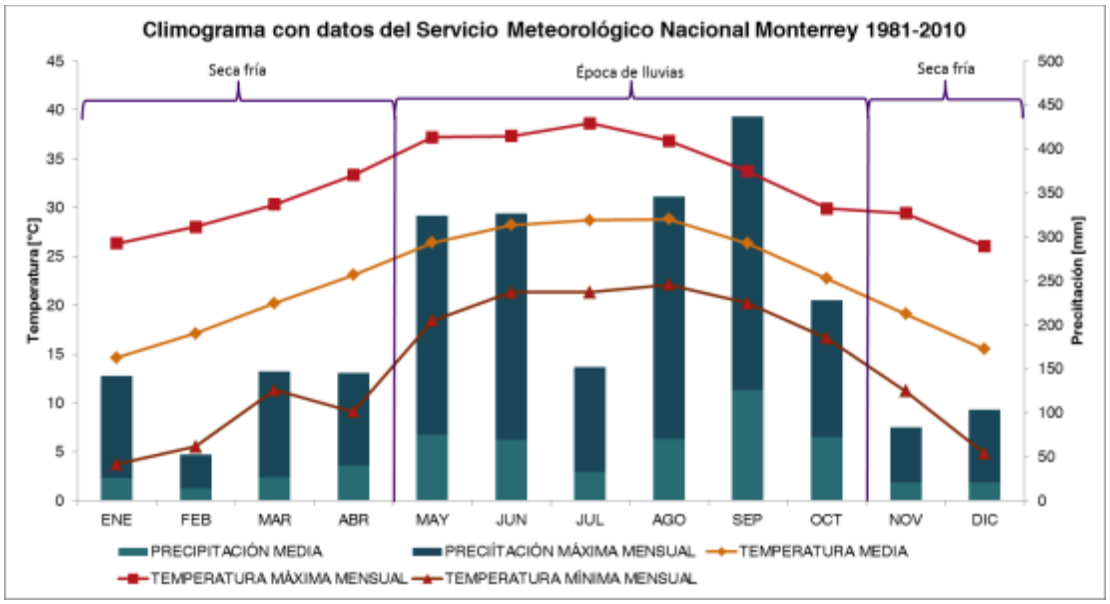
Figura 20 Precipitación y humedad relativa año 2014-2015 y 2016



El área de estudio presenta condiciones pobres de humedad relativa y precipitación pluvial agudizando los problemas de resuspensión de polvos de diversas fuentes ya que no se favorece un lavado atmosférico y se favorece a la formación de ozono troposférico. (ProAire Monterrey 2008-2012).

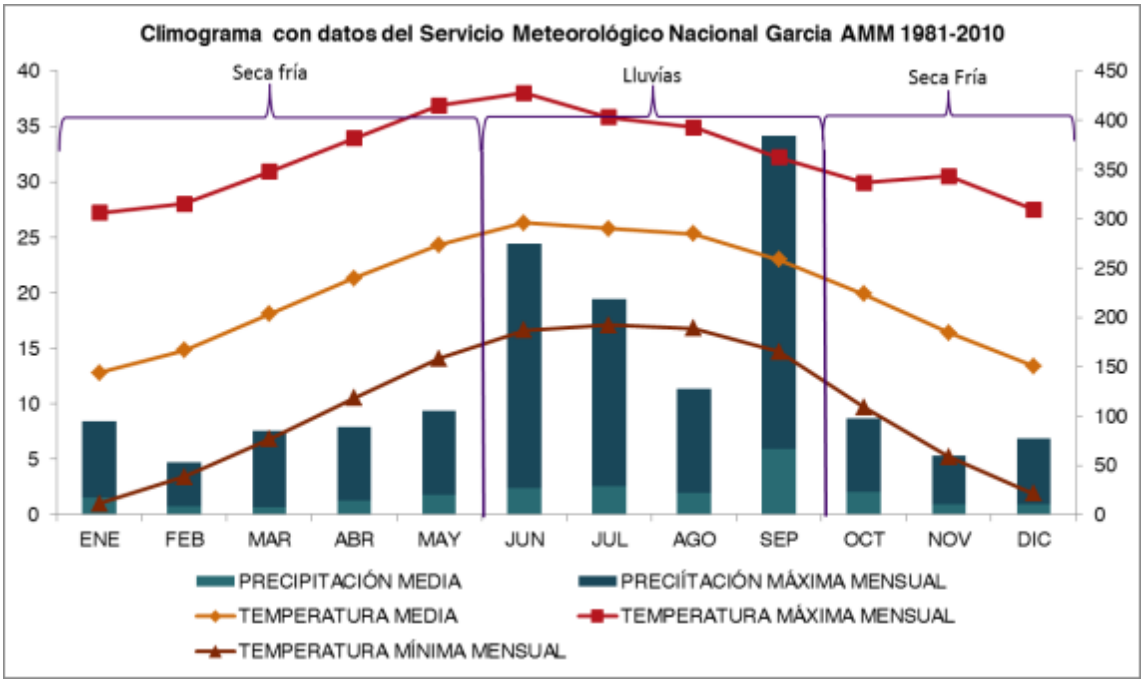
Como se observa en las Figuras (Figura 21y Figura 22), la ciudad de Monterrey presenta dos épocas definidas como época seca fría (noviembre a abril) y la época de lluvias (mayo a octubre), con un periodo muy pequeño de estiaje durante el mes de julio. Durante la época seca fría, en el AMM se presentan las condiciones ideales para la acumulación de material particulado ($PM_{2.5}$ y PM_{10}) ya que la precipitación es mínima y la temperatura es baja. Por otro lado, durante la época de lluvias, las concentraciones de contaminantes atmosféricos es baja gracias al arrastre generado por la precipitación, sin embargo, en días de escasa precipitación, las altas temperaturas, sumado a una alta radiación solar y poco viento favorecen la formación de ozono troposférico.

Figura 21 Climograma de Monterrey. (Elaboración propia con datos del CNA, 2018)



A continuación se muestra el climograma del Municipio de García que se encuentra en el extremo occidental de la región.

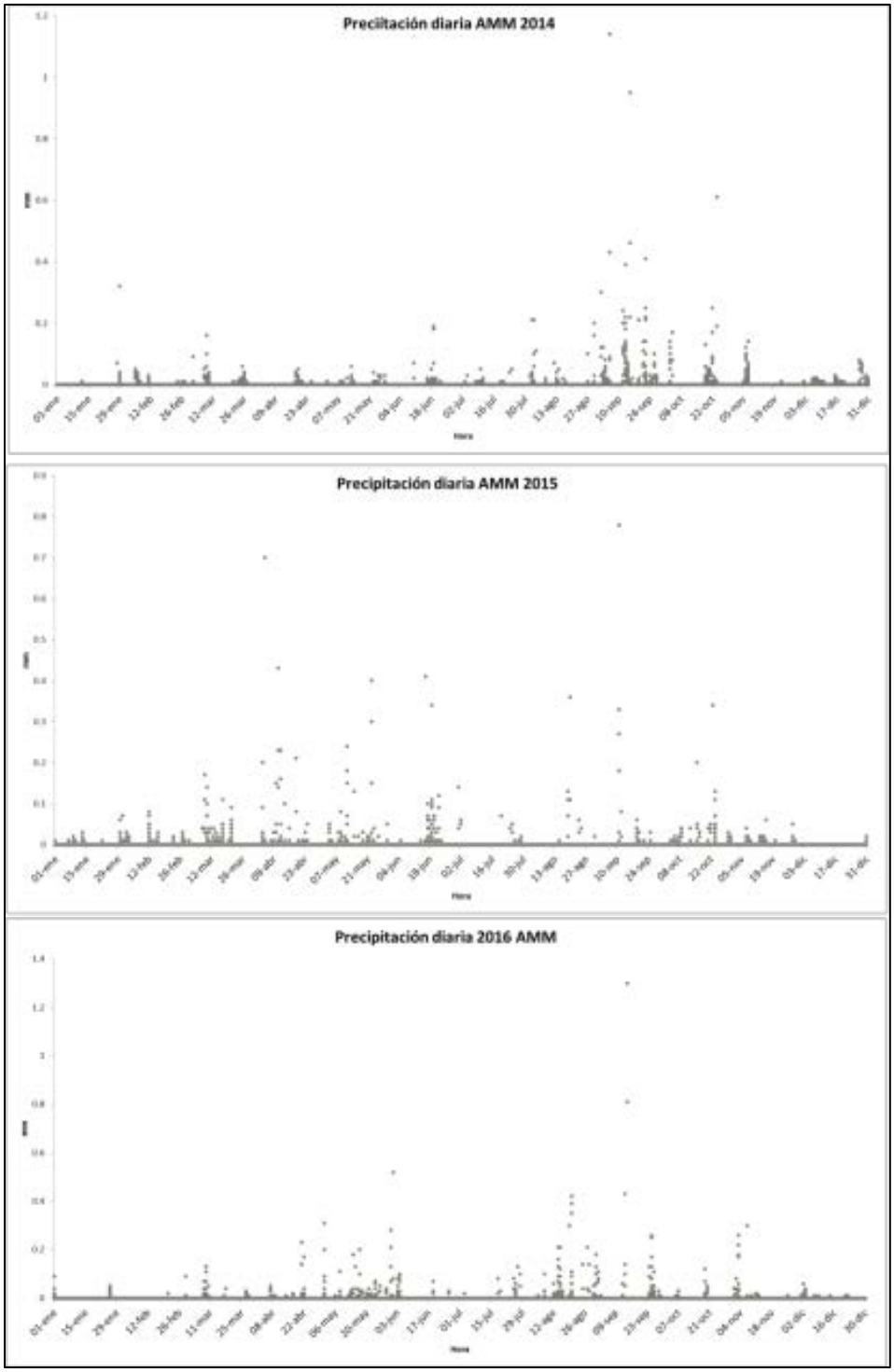
Figura 22 Climograma de García. (Elaboración propia con datos del CNA, 2018)



El climograma del municipio de García (estación Rinconada del CNA), muestra que la época seca fría empieza durante el mes de octubre hasta el mes de mayo, en contraste la época de lluvias da inicio en el mes de junio hasta su máximo durante el mes de septiembre. Para esta parte de la región, se espera que las concentraciones de material particulado se den en la época de seca fría y la temporada de ozono durante los meses de abril y mayo.

Las frecuencias de los promedios de precipitación diaria obtenidas durante los años 2014-2015 y 2016 (Figura 23), muestran un patrón de lluvias muy similar a los registrados durante los últimos 30 años en los climogramas anteriormente mostrados, reflejando, que en el AMM se presenta únicamente en la temporada seca-fría y de lluvias. Una razón a este comportamiento se debe a la ubicación geográfica del área (Norte), caracterizada por climas extremosos que no permiten que se presenten épocas como las seca cálida.

Figura 23 Frecuencia de eventos de lluvia durante 2014-2015-2016

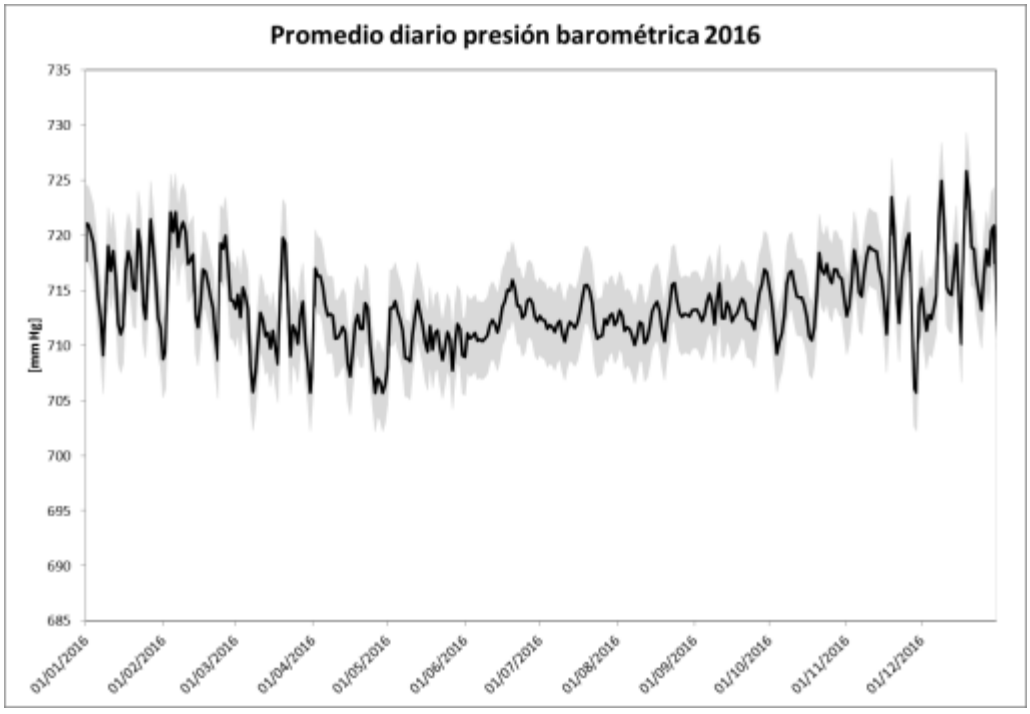


3.4 Presión Barométrica

La presión se define como la fuerza que ejerce la masa de la atmósfera sobre la superficie terrestre. Esta fuerza es proporcional a la densidad de la atmósfera y disminuye con la altitud. En un día despejado y seco la presión atmosférica es mayor en comparación con un día húmedo y lluvioso.

La presión atmosférica es de utilidad para el pronóstico de corto plazo en las condiciones de tiempo meteorológico. Por ejemplo, en días donde la presión atmosférica es alta y la velocidad del viento es débil, se presenta una alta concentración de contaminantes debido a la escasa dispersión vertical y horizontal de la contaminación. Las inversiones térmicas, que pueden provocar episodios de contaminación durante varios días consecutivos, ocurren dentro de un sistema de alta presión ya que el aire desciende adiabáticamente creando una capa de aire estable. Sin embargo, la presencia de subsidencia no necesariamente implica cambios en la presión en la superficie. (Ver Figura 24)

Figura 24 Serie de tiempo de los promedios diarios de la presión barométrica del AMM. La línea continua corresponde al promedio diario, mientras que la región marcada en gris corresponde a una desviación estándar.



El valor máximo de presión durante el año 2016 se presentó el día 19 de diciembre con un valor de 726 mm Hg, por otra parte, el valor mínimo medido fue de 705 mm Hg el día 26 de abril. El promedio de todo el año 2016 fue de 713 mm Hg.

3.5 Viento

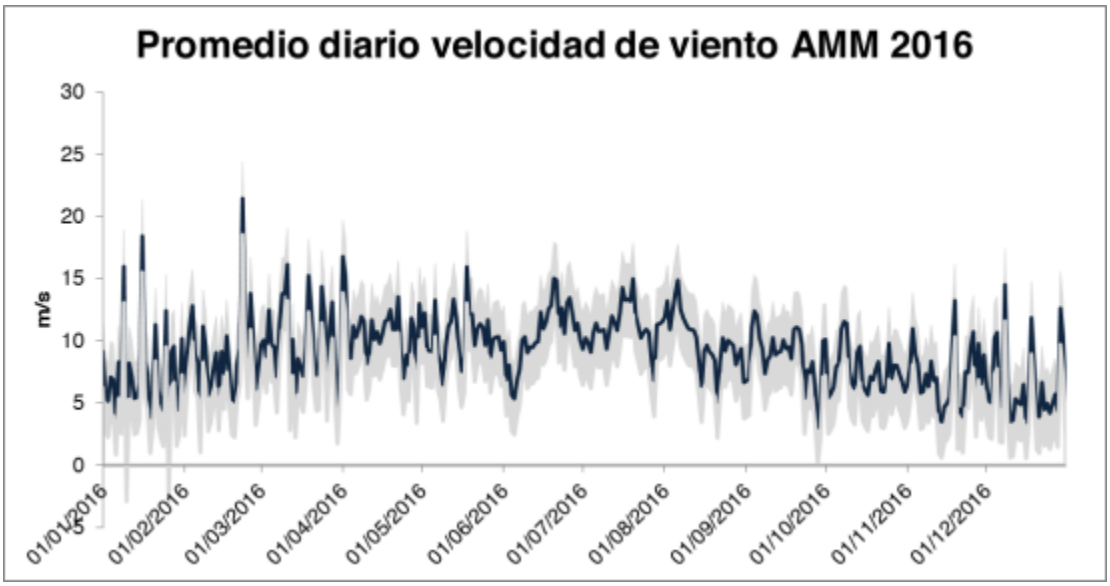
El viento se describe por dos variables, velocidad y dirección. Los datos que se obtienen por la medición de estos parámetros se grafican en una rosa de vientos La dispersión de una pluma de contaminantes depende de la combinación de los vectores dirección y velocidad y del gradiente térmico, los cuales, en su conjunto determinan las zonas y distancias que se verán más afectadas por las concentraciones a nivel de piso.

El viento dentro de la capa límite es importante para el transporte de contaminantes dentro y fuera de una cuenca, así como en la acumulación, transformación y dispersión de la contaminación.

La variabilidad diurna del viento está determinada fuertemente por la fisiografía de la región, y se caracteriza por flujos descendentes en las pendientes montañosas impulsados por la brisa de montaña en la noche y madrugada, los cuales convergen en la región central de la cuenca, favoreciendo la acumulación gradual de la contaminación emitida durante el periodo nocturno. Durante el amanecer, con la salida del sol, el calentamiento de las pendientes de las montañas genera un gradiente de temperatura que impulsa la elevación del aire caliente, creando así un movimiento de arrastre del viento desde la cuenca conocido como brisa de valle.

La variabilidad del viento durante el día en la Monterrey y su área metropolitana es el resultado de las variaciones de corto plazo en el balance de calor (suelo/ atmósfera), la humedad y de la interacción de las corrientes de viento de escalas local, regional y sinóptica. (Ver Figura 25)

Figura 25 Serie de tiempo de velocidad de viento en el AMM durante 2016. En la gráfica la línea morada indica el promedio diario, la región sombreada en gris corresponde a la desviación estándar. El gráfico se construyó empleando todos los datos de los sitios que miden este parámetro.



Empleando los resultados de las mediciones obtenidas en las estaciones de la red de monitoreo del AMM, el promedio de la velocidad escalar para el año 2016 fue de 9.10 m/s (33 Km/h). La velocidad del viento en la estaciones tienen una variabilidad diurna característica, con velocidades bajas durante la madrugada que incrementan gradualmente a partir de las 6:00, hasta alcanzar un máximo alrededor de las 14:00, disminuyendo durante la noche. (Ver Figura 26 y Mapa 2)

Figura 26 Serie de tiempo de la velocidad de viento del AMM. En la gráfica la línea azul oscura representa el promedio diario (2014,2015 y 2016), mientras que el área sombreada en azul claro corresponde a la desviación estándar. El gráfico se construyó, empleando todos los datos de los sitios que miden este parámetro.

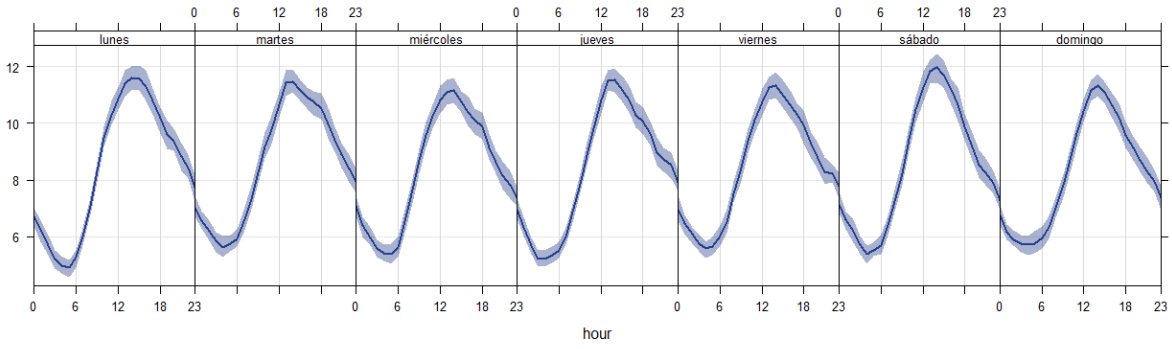
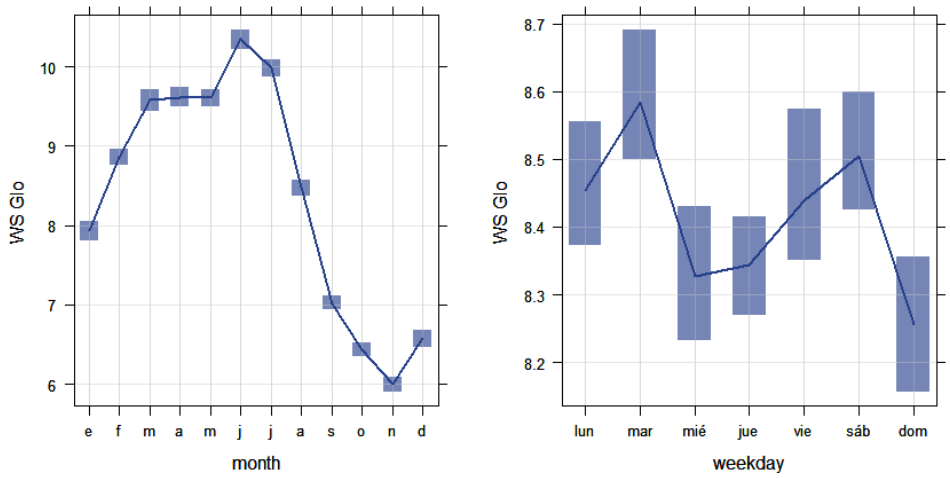
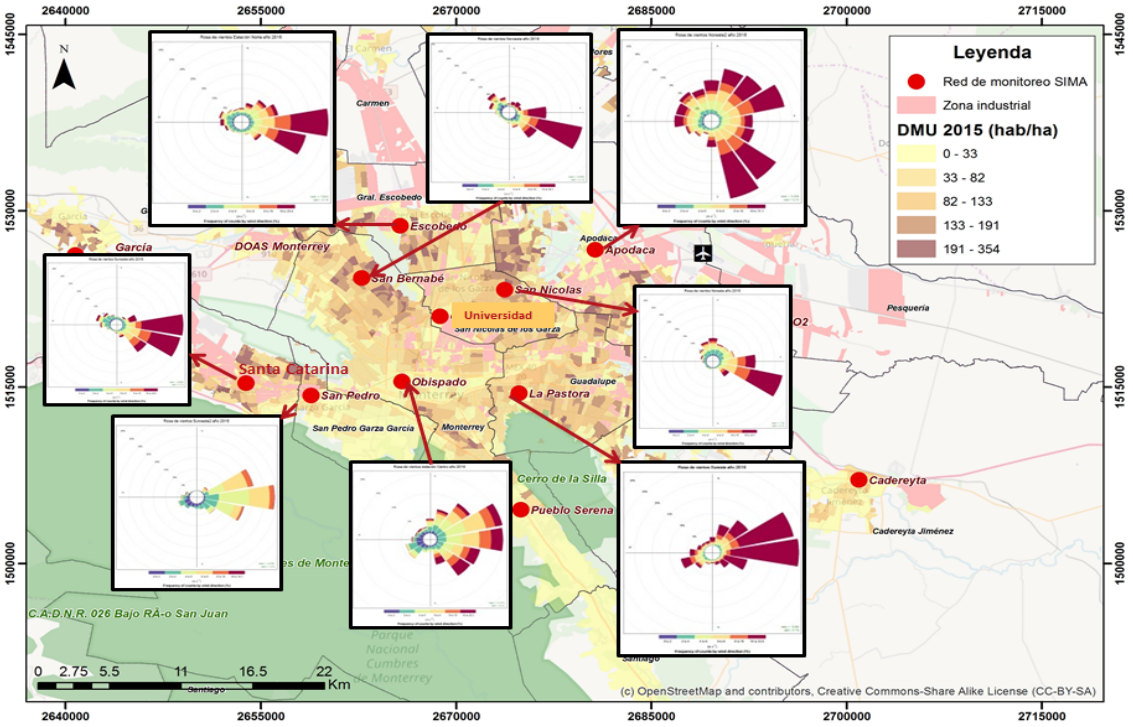


Figura 27 Series de tiempo de velocidad de viento del AMM por mes y semana durante el año 2016. El gráfico se construyó, empleando todos los datos de los sitios que miden este parámetro.

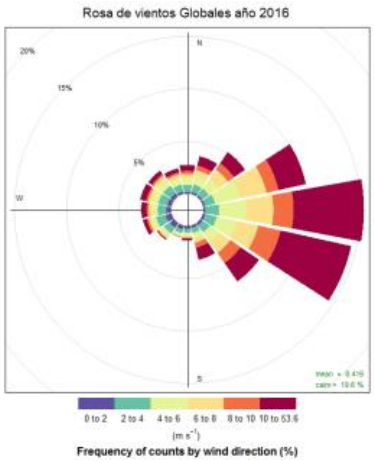


Mapa 2 Rosa de Vientos del AMM año 2016. Mapa elaborado con información obtenida de la red de monitoreo del AMM



La dirección de viento durante el año 2016 se caracterizó por correr de este a oeste. (Ver Figura 28). La velocidad máxima de viento fue de 53.59 m/s y tuvo lugar el día 16 de diciembre. Por otro lado, el valor mínimo de velocidad fue de 0.1 m/s y se presentó en los meses de julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre.

Figura 28 Rosa de Vientos AMM elaborada con información del Sistema de Monitoreo Ambiental de Monterrey (SIMA). Fuente: (Elaboración propia, 2018)



La Figura 29 muestra las rosas de vientos obtenidas por temporada (primavera, verano, otoño e invierno). Para todas las temporadas, la predominancia de los vientos es de este a oeste. El promedio, máximo y mínimo de velocidad de viento se presenta en la siguiente tabla

Figura 29 Rosa de vientos por temporadas del año 2016 elaborada a partir de los datos medidos por la red de monitoreo del SIMA. Fuente: (Elaboración propia, 2016)

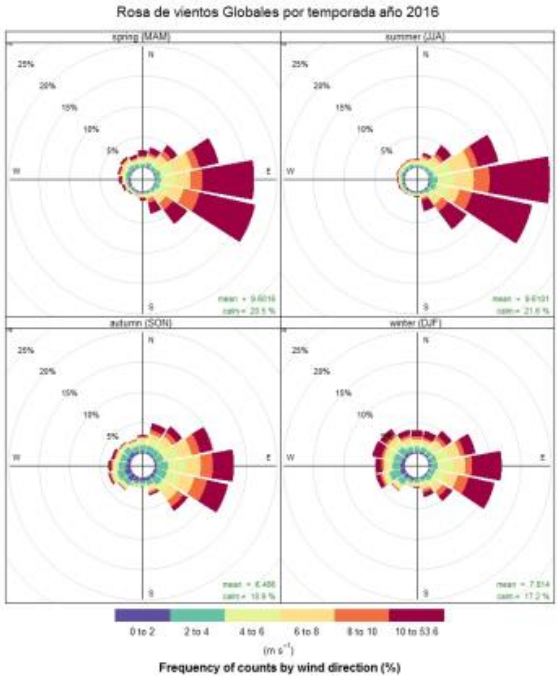


Tabla 2 Estadística básica de velocidad de viento AMM 2016

	Vientos AMM 2016 [m/s]			
	Mes	Promedio	Máximo	Mínimo
Primavera	Marzo, abril y mayo	8.48	34.5	0.6
Verano	Junio, julio y agosto	8.55	31.8	0.1
Otoño	Septiembre, octubre y noviembre	8.61	28.79	0.1
Invierno	Diciembre, enero y febrero	8.35	53.59	0.6

3.6 Radiación solar

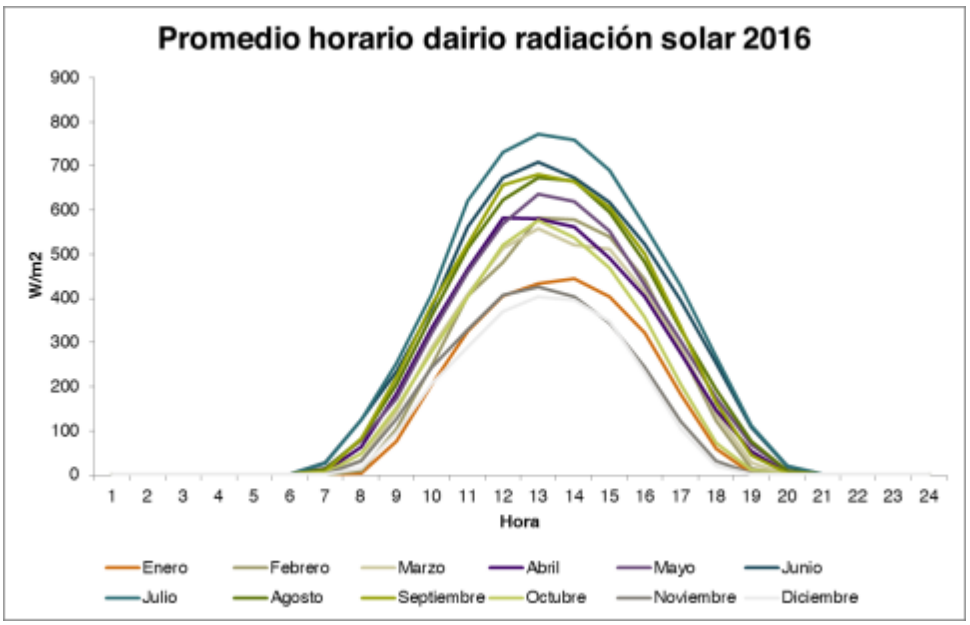
La radiación solar global se refiere a la cantidad total de energía solar recibida por la superficie de la Tierra, expresada en W/m^2. El espectro de radiación solar se extiende aproximadamente de 285 a 3000 nanómetros (nm). Los resultados de radiación solar se expresan en términos de irradiancia, que se refiere al flujo radiante (potencia) recibido por unidad de área (W/m^2).

La radiación solar influye en la temperatura ambiental, promueve el gradiente térmico que favorece el mezclado vertical en la atmósfera, y, por ende la dispersión de los contaminantes. Por ejemplo las menores concentraciones de contaminantes se registran en los meses más calurosos debido a un mayor mezclado vertical.

Las mayores tasas de radiación solar inducen a mayores reacciones fotoquímicas en la atmósfera que provoca la formación de ozono con implicaciones en la salud de las personas por daños en piel y ojos por sobreexposición a radiación ultravioleta de onda media (UV-B).

A continuación, se puede observar la variación horaria promedio de radiación solar medido en toda la red de monitoreo del AMM, para el año 2016. (Ver Figura 30)

Figura 30 Variación horaria promedio de la radiación solar global para diferentes meses de 2016. Los promedios se calcularon a partir de los valores horarios de todas las estaciones con datos válidos, para comparar los valores se utiliza la hora sin corrección por horario de verano.



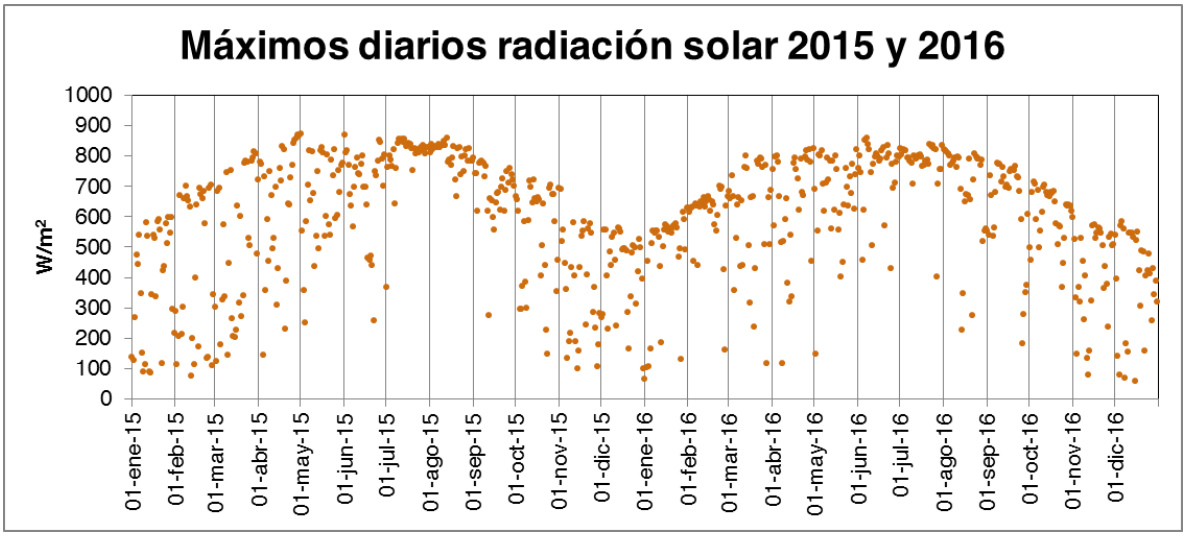
La variabilidad de la radiación observada en la Figura 30, presenta una forma Gaussiana con máximos durante las 13 horas y una distribución casi simétrica. Durante el año 2016, el valor máximo de radiación solar se presentó en el mes de Julio a las 13 horas con un valor de 771 W/m^2 mientras que el valor mínimo se observó en el mes de Febrero a las 22 horas con 0.74 W/m^2. La intensidad de la irradiancia se ve atenuada por la presencia de nubes y la contaminación del aire, esto explica por qué durante los meses de la temporada de lluvias disminuye la irradiancia total, a pesar de que durante este periodo el sol alcanza una mayor posición y los días son más largos, en contraste, durante el invierno, la declinación del sol es mayor y los días son más cortos, disminuyendo significativamente la

irradiancia total. Así mismo en invierno existe un aumento en la frecuencia e intensidad de las inversiones térmicas de superficie que favorecen la acumulación durante la mañana y hasta las primeras horas de la tarde.

Járegui y Luyando (1999) observaron que la contaminación atmosférica tenía un efecto sobre la radiación solar. Estos efectos pueden ser observados comparando las mediciones hechas en sitios de monitoreo ubicados en zonas urbanas vs aquellos sitios ubicados en zonas rurales. Se esperaría que en aquellos sitios ubicados en zonas urbanas la radiación solar sea menor a la de los sitios ubicados a la periferia o aquellos lugares lejos de fuentes de emisión y donde los contaminantes no se acumulan.

Como se ve en la Figura 31, los valores máximos de radiación solar medidos en 2015 y 2016 son más altos entre abril y agosto que son meses que se ubican en las estaciones de primavera y verano, épocas en donde la posición del sol hace más largos los días y se tenga mayor radiación solar.

Figura 31 Serie de tiempo con los promedio de los valores máximos diarios de la radiación global para los años 2015 y 2016. El promedio se estimó a partir de los máximos de las diferentes estaciones. Fuente (Elaboración propia, 2018)



4. Características de población, transporte e industria en el AMM

La población reportada para el AMM consiste en 4,521,811 habitantes de acuerdo con INEGI (2015). La actividad económica del Estado de Nuevo León se destaca por la industria manufacturera con la producción de maquinaria y equipo; la actividad del estado aporta al país aproximadamente 7.5% del PIB (INEGI, Producto Interno Bruto). Los sectores económicos contribuyen de la siguiente manera: sector primario 0.82% (agricultura, ganadería, aprovechamiento forestal como cultivo de maíz, sorgo, trigo, frijol, cebada y avena); sector secundario 37.03% (minería en la producción de barita y azufre, construcción, agua y gas, industria manufacturera; los principales giros industriales se encuentran en la industria de la cerveza, del cemento, bebidas embotelladas, industria manufacturera, mecatrónica y aeronáutica); y sector terciario 62.15% (comercio y servicios, transporte e información, servicios financieros e inmobiliarios).

5. Inventario de emisiones

5.1 Identificación de las principales fuentes de emisión de contaminantes

En esta sección se identifican las principales fuentes de emisión de la Zona Metropolitana de Monterrey. La metodología para la evaluación se basó en el análisis de información de los inventarios de emisión disponibles e información complementaria relevante para identificar las principales fuentes de emisión por categoría.

De manera general, se destacan los siguientes aspectos identificados para los diferentes tipos de fuentes:

- Las emisiones de la ZMM presentan características propias de zonas de marcado desarrollo industrial: las fuentes fijas son dominantes en cuanto a las emisiones de SO_2 y $PM_{2.5}$ y el transporte de carga es una de las principales fuentes de emisión de $PM_{2.5}$.
- Las fuentes fijas son responsables del 95% de las emisiones SO_2 y el 64% de las emisiones de $PM_{2.5}$. Las fuentes de emisión más representativas son el sector de petróleo y petroquímica y la industria química; las cuales en conjunto representan el 71% de la emisión de SO_2. Estos sectores, en conjunto con la industria del vidrio representan el 31% de las emisiones de $PM_{2.5}$
- Las fuentes móviles contribuyen con el 65% de la emisión de NOx y el 27% de la emisión de COVs en la ZMM. Las emisiones del transporte de carga

(ligera y pesada) y los automóviles particulares representan el 53% de la emisión de NOx en la ZMM.

- Las emisiones de fuentes de áreas representan el 62% de la contribución a los COVs y el 24% de las emisiones de $PM_{2.5}$. Destacan las emisiones del sector constricción, que representan el 8% de las emisiones de PM2.3 de la ZMM

5.2 Fuentes de Información Consideradas en el Análisis (ProAires)

La evaluación de la contribución sectorial de emisiones se realizó con el fin de identificar, a partir de la revisión de los inventarios de emisión disponibles para la ZMM, las fuentes de emisión prioritarias para incidir en una mayor reducción de emisiones en la Zona Metropolitana.

Las fuentes de información consideradas en el análisis incluyeron:

- Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Estado de Nuevo León (ProAire Nuevo León) 2016-2025. Documento e información de emisiones para el año base 2013.
- Inventario Nacional de Emisiones 2008. Documento e información de emisiones para el año base 2008.
- Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Área Metropolitana de Monterrey (ProAire Monterrey) 2008-2012. Documento e información de emisiones para el año base 2005.
- Inventario de Emisiones de los Estados de la Frontera Norte de México, 1999. Documento e información de emisiones para el año base 1999.
- Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Área Metropolitana de Monterrey (ProAire Monterrey) 1997-2002. Documento e información de emisiones para el año base 1995.
- Programa Regional de Administración de la Calidad del Aire en Zonas Criticas (INE-SEDESOL 1994). Documento e información de emisiones para el año base 1993.

Las bases de datos del ProAire Nuevo León 2016-2025 fueron usadas para identificar las principales fuentes de emisión en la ZMM. Las fuentes de información adicional permitieron complementar la información faltante por medio de proyecciones de los estudios disponibles. Este análisis será presentado en el siguiente entregable de este proyecto.

Las fuentes de emisión de los contaminantes analizados fueron priorizadas usando los criterios definidos en la Tabla 3.

Tabla 3 Criterios para la Identificación de Fuentes Prioritarias de Emisión

Criterio	Descripción
Top Fuente de Emisión	Fuentes que en conjunto contribuyen al 90% de las emisiones por contaminante.
Número de Fuentes	Identificación preliminar de la cantidad de fuentes por categoría de emisión.
Distribución Geográfica	Identificación de las características de la distribución geográfica por categoría de emisión.
Proyección de Emisiones	Variación de las emisiones proyectadas al año 2030.
Integralidad en la gestión	Interacción de las fuentes con otras fuentes de emisión.

5.3 Análisis de las emisiones en la ZMM

En este capítulo, Inicialmente se realiza un análisis breve de las metodologías empleadas en la construcción de los inventarios del AMM años base 2005 y 2013. Posteriormente se toma como inventario base el más actualizado (2013). . El objetivo de la comparación es lograr determinar si las metodologías empleadas siguen un patrón determinado o si por el contrario existió un cambio que modifica el resultado final. Es preciso mencionar que las metodologías empleadas en la elaboración de inventarios deberían estar estandarizadas sin importar el periodo de tiempo objeto de estudio, esto con el propósito de reducir la incertidumbre de los resultados a través del tiempo con lo que se lograría tener aproximaciones más cercanas a la realidad.

Fuentes de información para la consulta de los datos de inventarios se obtuvieron de los documentos como el Programa de Gestión Para Mejorar la Calidad del Aire del Área Metropolitana de Monterrey 2008-2012 y el Programa de Gestión Para Mejorar la Calidad del Aire del Estado de Nuevo León Pro Aire 2016-2025 . (Tabla 4)

Tabla 4 Metodologías empleadas en la elaboración del inventario de emisiones del AMM años base 2005 y 2013

Inventario año base 2005	Inventario año base 2013
Fuentes fijas: Se elaboró con información obtenida en las cédulas de operación anual de los establecimientos industriales de	Las metodologías utilizadas para la elaboración del inventario se basan en la serie de Manuales del Programa de Inventario de Emisiones de México, [4]la

[4] Radian International LLC, INE-SEMARNAP, USEPA, Western Governors' Association. Manuales del programa de inventarios de emisiones de México. Diciembre de 1997.

Inventario año base 2005	Inventario año base 2013
jurisdicción federal y estatal disponibles en la Dirección General de Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes DGGCARETC de la SEMARNAT y la Agencia de Protección al Medio Ambiente y Recursos Naturales (APMARN). El IE contiene la estimación de emisiones de 436 empresas, las cuales se desagregaron en diecisiete sectores industriales.	Guía de elaboración y uso de inventarios de emisiones[5], el Manual para la elaboración de inventario de emisiones de fuentes de área[6] y los procedimientos utilizados para la elaboración de los Inventarios Nacionales de Emisiones para México utilizados por la SEMARNAT. Así mismo se consideró metodologías e información actualizada por la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos de América (USEPA) así como metodologías y procedimientos propios desarrollados por LT Consulting,
Fuentes de área: Para la estimación de las emisiones por fuentes de área se incluyeron los establecimientos industriales y comerciales de diversos giros, cuyas emisiones se estiman de forma colectiva, así como otras actividades comerciales, de servicio y domésticas que en conjunto sumaron veinte subcategorías de fuentes de área donde doce están relacionadas con emisiones evaporativas de compuestos orgánicos, cuatro con sistemas de combustión domésticos y comerciales y una de incendios forestales y tres actividades de resuspensión de partículas. **Fuentes móviles:** Fue desarrollado por el Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM)	

[5] INE-SEMARNAT, Western Governors' Association. *Guía de elaboración y uso de inventarios de emisiones*. Mayo de 2005.
[6] INE-SEMARNAT. *Manual para la elaboración y uso de inventarios de emisiones*. Mayo de 2008.

Inventario año base 2005	Inventario año base 2013
como parte de una tesis. Se utilizó el software MOBILE 6, programa diseñado para estimas las emisiones de vehículos automotores que para Monterrey incluyó la estimación de emisiones de diecisiete subcategorías de vehículos de gasolina y diésel, tanto de uso privado como transporte público de pasajeros y transporte de carga.	
Fuentes móviles no carretera: Se evaluaron únicamente las emisiones de los equipos y máquinas de construcción además de los tractores agrícolas y su estimación se hizo a partir de la extrapolación de las emisiones del Inventario Nacional de Emisiones de México 1999.	
Fuentes Naturales: Incluyen las emisiones provenientes de la vegetación y suelos. La estimación de emisiones se realizó a partir de la aplicación del modelo GloBEIS (Sistema Global de Emisiones e Interacciones de la Biósfera) a través del cual se estiman las emisiones biogénicas de COV y las emisiones de partículas de origen eólico sobre suelos erosionados.	

Fuente: Elaboración propia con datos de ProAire Monterrey

Un análisis previo denota que las metodologías empleadas para la construcción de inventarios de emisiones hechos en los ProAire son diferentes, lo que genera, la falta de trazabilidad de las emisiones por tipo de fuente, así como también, la carencia de una evaluación más precisa de la efectividad de las medidas adoptadas en cada ProAire. Es de importancia estandarizar las metodologías empleadas en cada actualización, puesto que inventarios estandarizados y que siguen metodologías similares, brindan panoramas de desempeño de políticas de reducción de emisiones más precisas por cada tipo de fuente y reducen la incertidumbre en los inventarios.

El inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos del año 2013, publicado en el ProAire de Nuevo León 2016-2015 (Secretaría de Desarrollo Sustentable del Estado de Nuevo León, 2017) se usó como base para los análisis de emisiones. En la Tabla 5 y Figura 32 Distribución porcentual por fuente de emisión del Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana de Monterrey, año base 2013. Se presenta el resumen agregado de las emisiones y su distribución porcentual por categoría. Las emisiones totales de $PM_{2.5}$ superan las 6,900 toneladas al año, con una contribución mayoritaria de las fuentes fijas (64%), seguidas por las fuentes de área, cuyas emisiones alcanzan el 24%. En relación con el SO_2, la industria domina las emisiones con una contribución del 95%. Las fuentes móviles por su parte contribuyen con el 65% de las emisiones de NOx y el 27% de las emisiones de COVs.

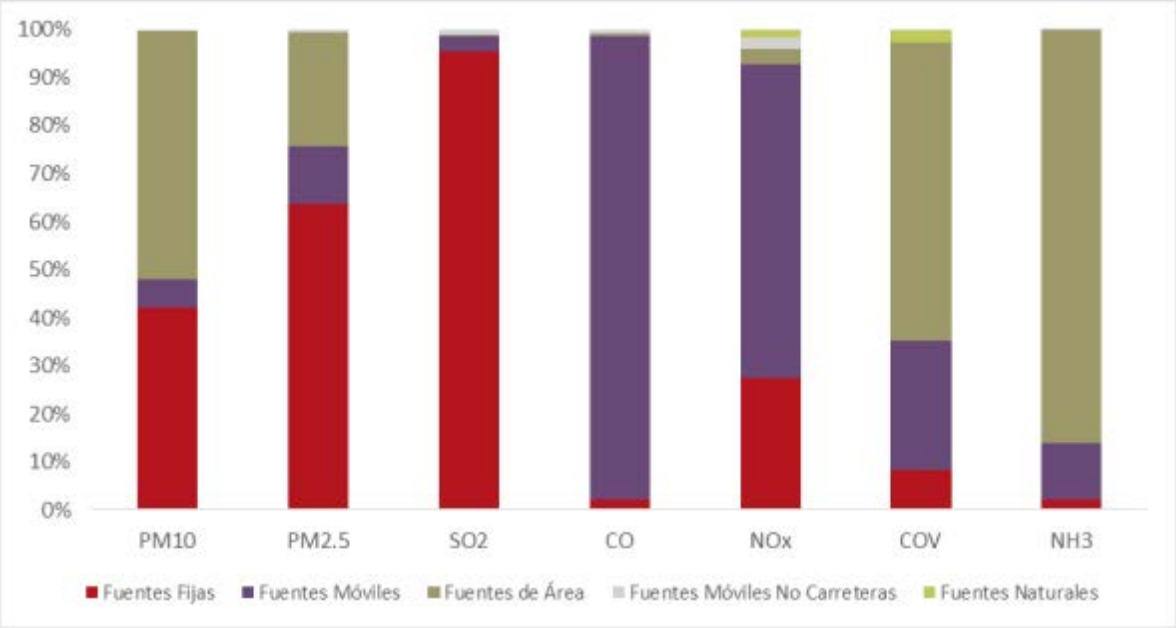
La configuración de las emisiones de contaminantes atmosféricos de la ZMM da cuenta del marcado carácter industrial de la zona. Un abordaje integral de la gestión de la calidad del aire deberá tener esto en consideración.

Tabla 5 Resultados por fuente de emisión del Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana de Monterrey, año base 2013.

Fuente de emisión	Emisiones de contaminante (ton/año)						
	PM_{10}	$PM_{2.5}$	SO_2	CO	NOx	COV	NH_3
Fuentes móviles carreteras	643.3	606.6	234.7	232,946.3	29,035.2	22,261.6	931.6
Fuentes móviles no carreteras	23.1	21.9	79.5	1,767.0	1,089.8	167.9	0.1
Fuentes fijas	4,662.3	3,221.0	6,613.0	5,284.5	12,208.5	6,749.8	160.3
Fuentes de área	5,707.5	1,207.5	5.7	1,733.6	1,344.6	51,370.6	6,722.3

Fuente de emisión	Emisiones de contaminante (ton/año)						
	PM_{10}	$PM_{2.5}$	SO_2	CO	NOx	COV	NH_3
Fuentes naturales	NA	NA	NA	NA	746.4	2,133.1	NA
Total	**11,036.2**	**5,057.0**	**6,932.9**	**241,731.4**	**44,424.5**	**82,683**	**7,814.3**

Figura 32 Distribución porcentual por fuente de emisión del Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana de Monterrey, año base 2013.



5.4 Análisis de Emisiones por Tipo de Fuente

En las Tablas (Tabla 6 y Tabla 7) se presentan las emisiones desagregadas por tipo de fuentes. Se resaltan en rojo aquellas fuentes cuyas emisiones en conjunto representan el 90% de las emisiones por contaminantes. A partir de este análisis se puede identificar de manera específica la contribución de las diferentes fuentes a las emisiones sirviendo como elemento para su priorización, así como la identificación de los principales aportantes por tipo de contaminantes.

Tabla 6 Distribución de Emisiones por Tipo de Fuente (ton/año)

SECTOR	Emisión de contaminantes 2013 (ton/año)						
	PM10	PM2.5	SO2	CO	NOx	COV	NH3
Fuentes Fijas	**4,662**	**3,221**	**6,613**	**5,285**	**12,209**	**6,750**	**160**
Automotriz	239	157	253	149	606	465	0

SECTOR	Emisión de contaminantes 2013 (ton/año)						
	PM10	PM2.5	SO2	CO	NOx	COV	NH3
Celulosa y papel	63	45	253	77	235	576	1
Cemento y cal	336	239	248	615	776	4	0
Extracción y beneficio de materiales no metálicos	1,136	326	0	0	0	0	0
Fabricación de artículos y productos de cerámica, arcilla o similares	75	60	9	145	168	12	1
Fabricación de artículos y productos metálicos	54	53	11	157	581	320	0
Fabricación de artículos y productos plásticos	0	0	0	2	2	1	0
Generación de energía eléctrica	162	135	326	426	495	38	21
Industria alimenticia	265	87	8	237	254	98	80
Metalúrgica (incluye siderúrgica)	346	303	165	375	918	231	1
Petróleo y petroquímica	595	616	3,350	662	1,935	2,269	34
Pinturas y tintas	158	162	0	8	23	483	0
Producción de aparatos, equipos y/o accesorios eléctricos y/o electrónicos	68	47	45	263	103	211	1
Producción de asfalto	128	37	187	660	2,624	35	0
Química	659	530	1,529	971	1,130	1,834	23
Tratamiento de residuos peligrosos	1	0	0	1	3	7	0
Vidrio	376	424	228	537	2,356	167	0
Fuentes Móviles	**643**	**607**	**235**	**232,946**	**29,035**	**22,262**	**932**
Autobús	228	268	11	13,454	4,870	771	6
Automóvil Particular	135	89	83	86,832	9,535	8,735	535
Carga ligera y pickups	96	73	64	92,321	6,911	9,575	272
Carga pesada	126	137	47	24,103	5,987	1,679	34
Motocicleta	18	13	4	6,028	748	1,155	12
Taxi	40	26	26	10,208	984	346	31
Fuentes de Área	**5,708**	**1,208**	**6**	**1,734**	**1,345**	**51,371**	**6,722**
Aplicación de asfalto	0	0	0	0	0	312	0
Artes gráficas	0	0	0	0	0	1,522	0

SECTOR	Emisión de contaminantes 2013 (ton/año)						
	PM10	PM2.5	SO2	CO	NOx	COV	NH3
Asadores con carbón vegetal (comercial y residencial)	6	5	3	758	11	5	0
Caminos no pavimentados	2,195	448	0	0	0	0	0
Caminos pavimentados	1,510	347	0	0	0	0	0
Combustión comercial	2	2	2	53	178	12	0
Combustión doméstica	7	7	1	85	539	42	5
Construcción urbana e industrial	1,984	396	0	0	0	0	0
Consumo doméstico de solventes	0	0	0	0	0	17,432	0
Distribución y venta de gas LP	0	0	0	0	0	310	0
Distribución y venta de gasolina	0	0	0	0	0	4,859	0
Fugas de Gas LP (doméstico y comercial)	0	0	0	0	0	8,293	0
Incendios forestales	3	3	0	47	1	13	27
Lavado en seco	0	0	0	0	0	769	0
Limpieza de superficies	0	0	0	0	0	6,858	0
Operación de aeronaves	1	1	0	791	615	742	0
Panaderías (fermentación de levadura)	0	0	0	0	0	498	0
Pintura tránsito	0	0	0	0	0	123	0
Re pintado automotriz	0	0	0	0	0	522	0
Recubrimiento de superficies arquitectónicas	0	0	0	0	0	4,502	0
Recubrimiento de superficies industriales	0	0	0	0	0	4,556	0
Aplicación de fertilizantes	0	0	0	0	0	0	1,588
Emisiones domésticas de amoniaco	0	0	0	0	0	0	1,187
Emisiones ganaderas de amoniaco	0	0	0	0	0	0	3,916
Fuentes Móviles No Carreteras	**23**	**22**	**80**	**1,767**	**1,090**	**168**	**0**
Fuentes Naturales	**---**	**---**	**---**	**---**	**746**	**2,133**	**---**
Total	**11,036**	**5,057**	**6,933**	**241,731**	**44,425**	**82,683**	**7,814**

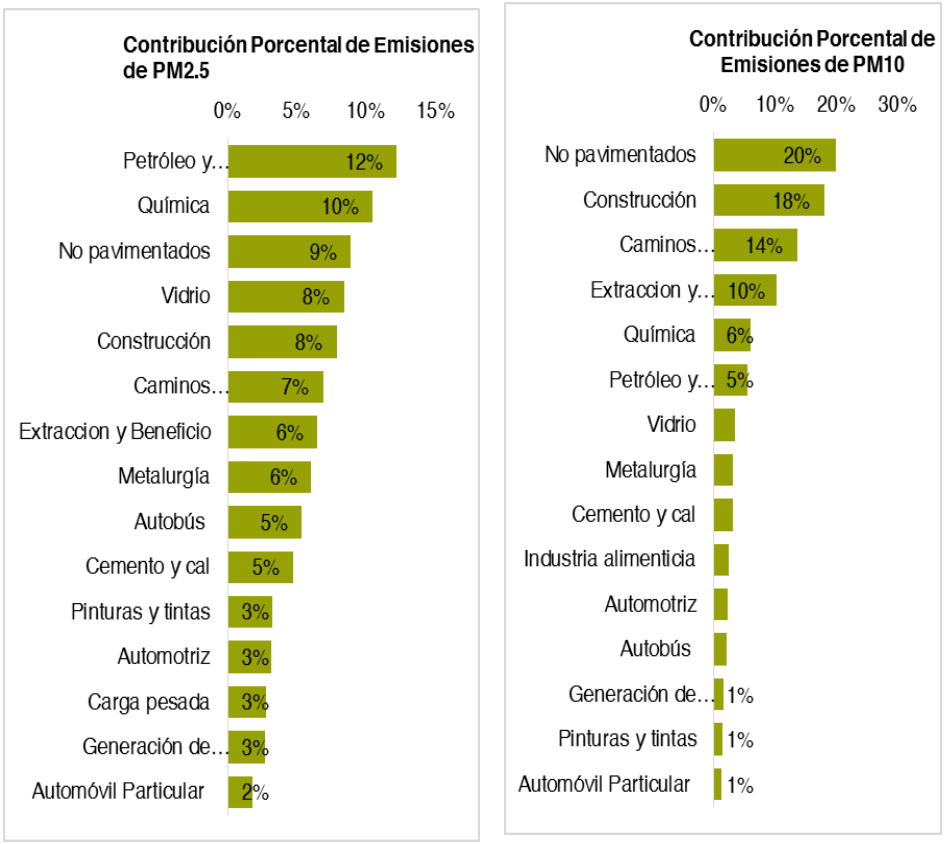
Tabla 7 Distribución Porcentual de Emisiones por Tipo de Fuente

SECTOR	Emisión de contaminantes 2013 (%)						
	PM10	PM2.5	SO2	CO	NOx	COV	NH3
Fuentes Fijas	**42%**	**64%**	**95%**	**2%**	**27%**	**8%**	**2%**
Automotriz	2%	3%	4%	0%	1%	1%	0%
Celulosa y papel	1%	1%	4%	0%	1%	1%	0%
Cemento y cal	3%	5%	4%	0%	2%	0%	0%
Extracción y beneficio de materiales no metálicos	10%	6%	0%	0%	0%	0%	0%
Fabricación de artículos y productos de cerámica, arcilla o similares	1%	1%	0%	0%	0%	0%	0%
Fabricación de artículos y productos metálicos	0%	1%	0%	0%	1%	0%	0%
Fabricación de artículos y productos plásticos	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Generación de energía eléctrica	1%	3%	5%	0%	1%	0%	0%
Industria alimenticia	2%	2%	0%	0%	1%	0%	1%
Metalúrgica (incluye siderúrgica)	3%	6%	2%	0%	2%	0%	0%
Petróleo y petroquímica	5%	12%	48%	0%	4%	3%	0%
Pinturas y tintas	1%	3%	0%	0%	0%	1%	0%
Producción de aparatos, equipos y/o accesorios eléctricos y/o electrónicos	1%	1%	1%	0%	0%	0%	0%
Producción de asfalto	1%	1%	3%	0%	6%	0%	0%
Química	6%	10%	22%	0%	3%	2%	0%
Tratamiento de residuos peligrosos	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Vidrio	3%	8%	3%	0%	5%	0%	0%
Fuentes Móviles	**6%**	**12%**	**3%**	**96%**	**65%**	**27%**	**12%**
Autobús	2%	5%	0%	6%	11%	1%	0%
Automóvil Particular	1%	2%	1%	36%	21%	11%	7%
Carga ligera y pickups	1%	1%	1%	38%	16%	12%	3%
Carga pesada	1%	3%	1%	10%	13%	2%	0%
Motocicleta	0%	0%	0%	2%	2%	1%	0%
Taxi	0%	1%	0%	4%	2%	0%	0%
Fuentes de Área	**52%**	**24%**	**0%**	**1%**	**3%**	**62%**	**86%**

SECTOR	Emisión de contaminantes 2013 (%)						
	PM10	PM2.5	SO2	CO	NOx	COV	NH3
Aplicación de asfalto	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Artes gráficas	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%
Asadores con carbón vegetal (comercial y residencial)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Caminos no pavimentados	20%	9%	0%	0%	0%	0%	0%
Caminos pavimentados	14%	7%	0%	0%	0%	0%	0%
Combustión comercial	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Combustión doméstica	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%
Construcción urbana e industrial	18%	8%	0%	0%	0%	0%	0%
Consumo doméstico de solventes	0%	0%	0%	0%	0%	21%	0%
Distribución y venta de gas LP	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Distribución y venta de gasolina	0%	0%	0%	0%	0%	6%	0%
Fugas de Gas LP (doméstico y comercial)	0%	0%	0%	0%	0%	10%	0%
Incendios forestales	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Lavado en seco	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%
Limpieza de superficies	0%	0%	0%	0%	0%	8%	0%
Operación de aeronaves	0%	0%	0%	0%	1%	1%	0%
Panaderías (fermentación de levadura)	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%
Pintura tránsito	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Re pintado automotriz	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%
Recubrimiento de superficies arquitectónicas	0%	0%	0%	0%	0%	5%	0%
Recubrimiento de superficies industriales	0%	0%	0%	0%	0%	6%	0%
Aplicación de fertilizantes	0%	0%	0%	0%	0%	0%	20%
Emisiones domésticas de amoniaco	0%	0%	0%	0%	0%	0%	15%
Emisiones ganaderas de amoniaco	0%	0%	0%	0%	0%	0%	50%
Fuentes Móviles No Carreteras	**0%**	**0%**	**1%**	**1%**	**2%**	**0%**	**0%**
Fuentes Naturales	**---**	**---**	**---**	**---**	**2%**	**3%**	**---**
Total	**100%**	**100%**	**100%**	**100%**	**100%**	**100%**	**100%**

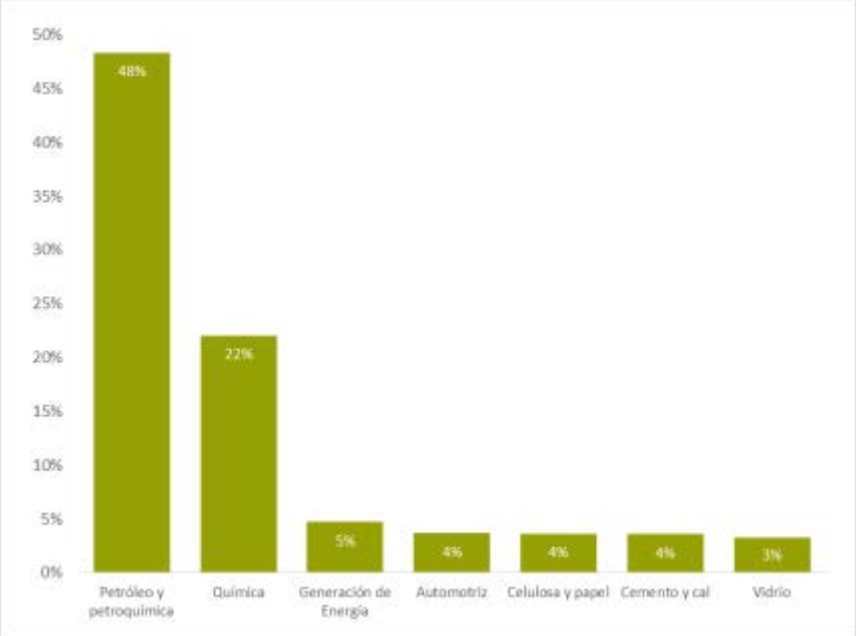
Fuente: Elaboración propia con base en ProAire Nuevo León

Figura 33 Distribución porcentual por fuente de emisión del Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana de Monterrey, año base 2013. Fuente: Elaboración Propia con base en ProAire Nuevo León



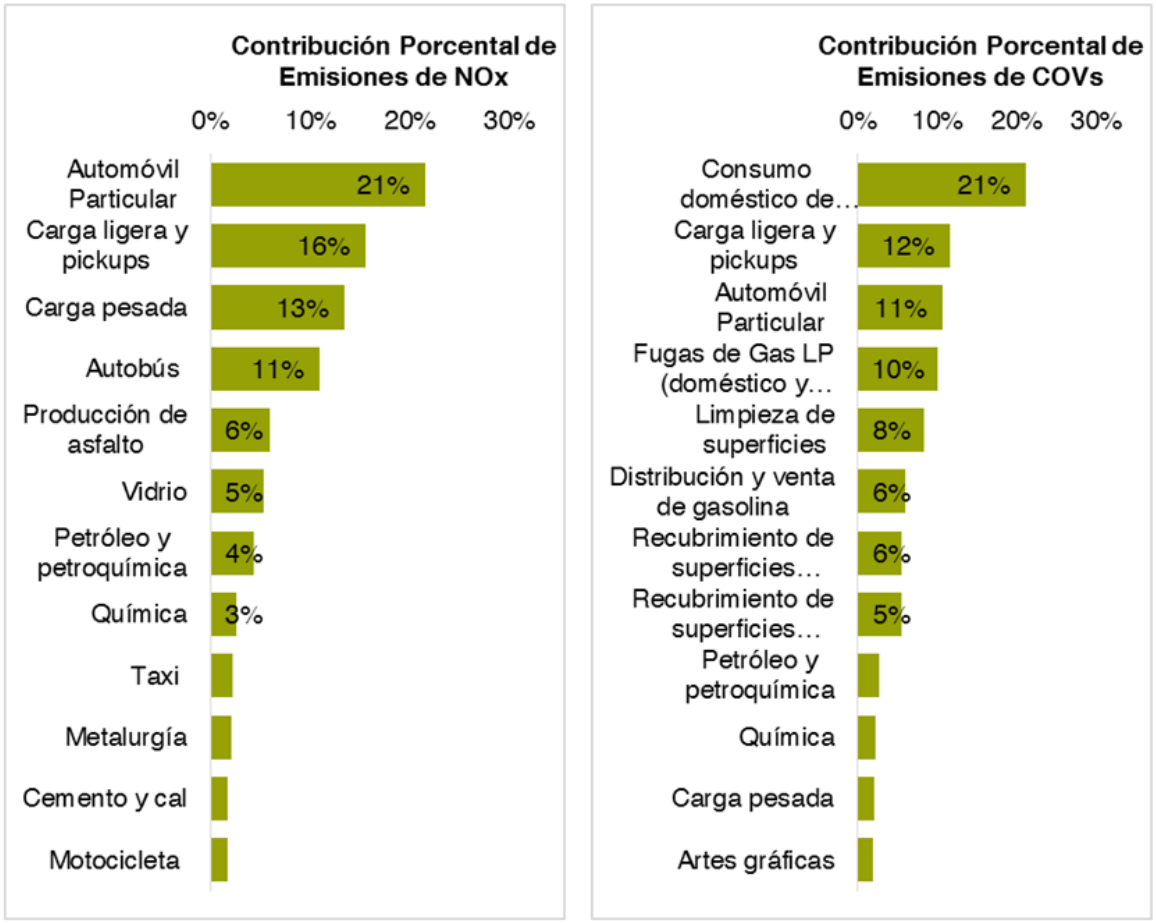
En la Figura 33 se presentan las principales fuentes de emisión de $PM_{2.5}$ y PM_{10}. Las emisiones de $PM_{2.5}$ se encuentran influenciadas por las fuentes industriales. La industria del Petróleo y Petroquímica; la industria química y la industria del vidrio son responsables del 30% de las emisiones de $PM_{2.5}$. Otros sectores como la extracción de materiales (6%), la construcción (8%); y a metalurgia (6%) representan importantes contribuciones a las emisiones de este contaminante. De manera complementaria, se destacan las emisiones del $PM_{2.5}$ provenientes de los autobuses (4%) y las del sector de transporte de carga pesada (3%). Adicionalmente, el inventario destaca la contribución de emisiones de PM_{10} provenientes de vías sin pavimentar, si bien importantes, se destaca que existe mayor incertidumbre en los procesos de estimación de estas emisiones.

Figura 34 Principales Fuentes de Emisión de SO_2 (%). Fuente: Elaboración propia con base en ProAire Nuevo León



En la Figura 35 se presentan las principales fuentes de emisión de los precursores de ozono. En el caso de las emisiones de NOx, las principales fuentes de emisión son los automóviles particulares (21%); el sector de carga ligera (16%); carga (13%) y autobuses (11%) en conjunto estos sectores contribuyen con el 61% de las emisiones de NOx. En el caso de las emisiones de COVs, la principal fuente de emisión es el consumo doméstico de solventes (21%), seguido de del transporte de carga ligera (12%) y automóviles (11%); las fugas de GLP alcanzan el 10% de las emisiones de COVs. La configuración de las emisiones de precursores del ozono hace evidente la influencia de las emisiones con procesos asociados al uso de gasolinas en el sector transporte.

Figura 35 Principales Fuentes de Emisión de Precursores de Ozono (%)



En las siguientes subsecciones se presenta una descripción de las características de los diferentes tipos de fuentes y su influencia en la generación de emisiones. Los análisis de esta sección se complementan con la revisión de la información de monitoreo de la calidad del aire que se presenta más adelante en este documento.

5.4.1 Fuentes Fijas

Como se describe en el Capítulo 2 de este documento, la ZMM tiene una marcada tradición industrial. Más allá, el análisis de las emisiones indica que el sector industrial también tiene un importante rol en la contribución de emisiones. Las fuentes industriales representan la principal emisión de $PM_{2.5}$ y SO_2, más allá, actividades conexas a las actividades industriales como el transporte de carga y los viajes en automóviles generan importantes emisiones de NO_x y COVs.

La emisión de contaminantes en este sector industrial se debe principalmente a los procesos de combustión y a las emisiones específicas del proceso productivo. Los procesos de combustión se realizan en equipos de calentamiento indirecto (calderas

y generadores de vapor, entre otros). Las altas emisiones de SO_2 y $PM_{2.5}$ provenientes de este tipo de fuentes dan evidencia del uso de combustibles sólidos como el carbón.

En términos de fuentes fijas de emisión, destaca la importancia relativa del sector Petróleo y Petroquímica; y de la industria química. Si bien la contribución específica de estas fuentes es importante, la reducción de emisiones en la industria requiere de una visión integral para el desarrollo de una industria limpia y la identificación de las contribuciones por clúster productivos. En el Mapa 3 se presenta un mapa desarrollado por el CMM con la ubicación de la industria y sus emisiones de CO_2 para el año 2015.

En relación con el sector industrial es importante destacar:

1) El sector de petróleo y petroquímica es la principal fuente de emisión industrial (49% SO_2, 12% $PM_{2.5}$, 5% PM_{10}, 5% NO_x, 3% COV). La principal fuente que genera casi todas las emisiones, corresponden a la Refinería Ing. Héctor R. Lara Sosa, ubicada en Cadereyta Jiménez. La refinería usa mezclas de combustóleo y gas natural para la generación de electricidad y vapor y desarrolla procesos de desintegración catalítica, hidrosulfuradora, y alquilación que representan la principal fuente de emisión de SO_2.

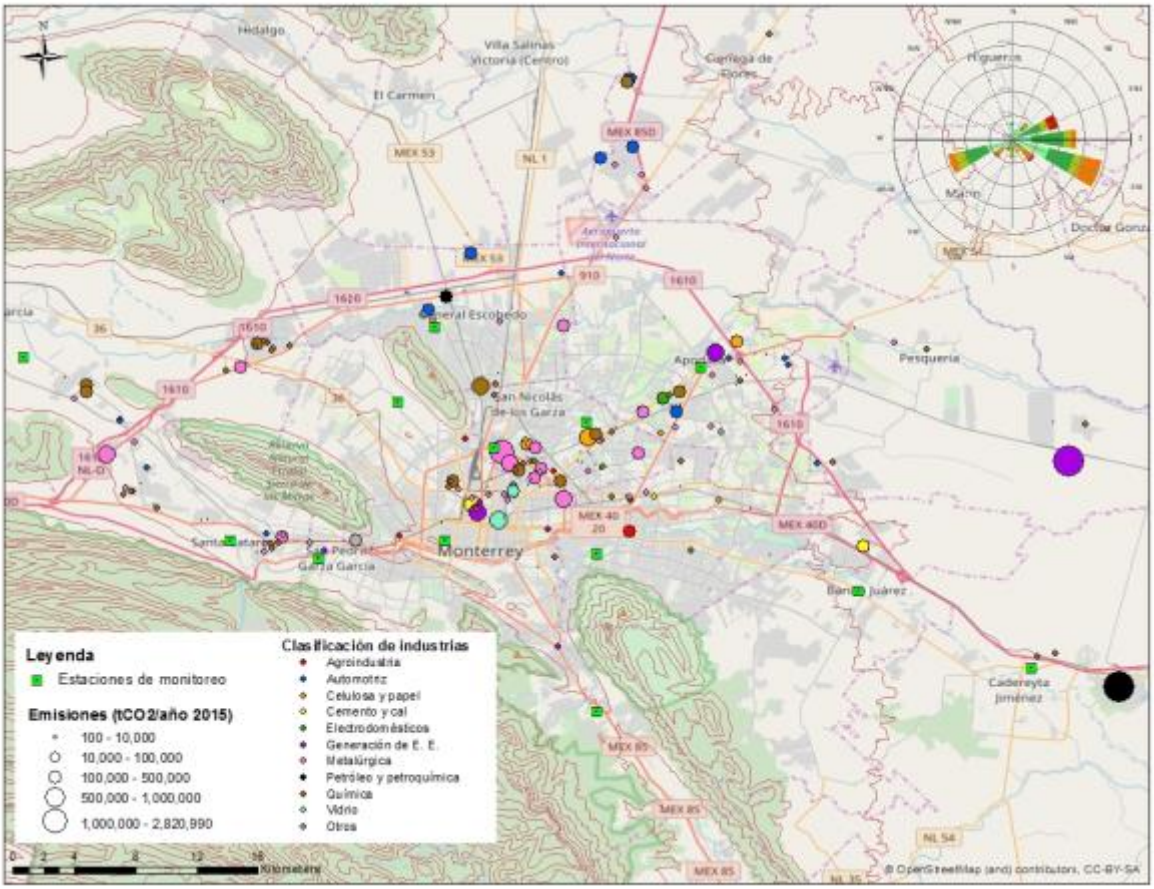
2) El sector químico es la segunda fuente industrial con mayores emisiones (22% SO_2, 11% $PM_{2.5}$, 6% PM_{10}, 3% NO_x, 2% COV), debido a la presencia de diferentes industrias presentes en la ZMM dedicadas a la química fina.

3) El sector de la construcción, entendida como las actividades constructivas; la industria de cemento y cal; y la extracción y beneficio de material no metálico aporta el 19% de las emisiones de $PM_{2.5}$ y el 31% de la emisión de PM_{10}, lo cual hace prioritario al sector.

4) La industria del vidrio contribuye con el 8% de las emisiones de $PM_{2.5}$ y el 3% de las emisiones de COVs. De acuerdo con el Mapa 3, existen dos fuentes principales en este sector, por lo cual se anticipa que su emisión por unidad productiva debe ser alta[7].

[7] Esta información debe ser verificada a través de información de la cédula de operación anual o información complementaria

Mapa 3 Ubicación de las Fuentes Industriales de la ZMM y emisiones de CO_2



5.4.2 Fuentes Móviles Carreteras

Las emisiones de contaminantes de las fuentes móviles están directamente relacionadas con el tipo de combustible utilizado. El uso de diésel es la principal fuente de emisiones de $PM_{2.5}$ y SO_2, mientras que la gasolina genera la mayor parte de las emisiones de NO_x y COV, estos últimos también como emisiones evaporativas debido a la volatilidad de este combustible. Las emisiones por fuentes móviles también se encuentran influenciadas por factores como el nivel de actividad vehicular (kilómetros recorridos), las tecnologías de control de emisiones, la edad de la flota vehicular y el cumplimiento de los programas de verificación vehicular.

En el caso de la ZMM, el sector de carga (ligera y pesada) representa el 29% de las emisiones de NOx; la carga liviana contribuye con el 12% de las emisiones de COVs. Los automóviles particulares emiten el 21% del NOx y el 11% de los COVs. Destaca la contribución de los autobuses a las emisiones de $PM_{2.5}$, pese a su menor número de unidades, estas fuentes son responsables del 5% de la emisión, lo cual sugiere la oportunidad de modernización de la flota de transporte público.

5.4.3 Fuentes de Área

Las fuentes de área representan una importante contribución a las emisiones de PM_{10} (52%) y $PM_{2.5}$ (24%), así como a las emisiones de COVs (62%), Las principales fuente de emisión de estos últimos es el uso de solventes y los recubrimientos arquitectónicos así como las fugas de gas LP. En relación a las emisiones de partículas, esta contribución se asocia principalmente a la construcción y a las emisiones de vialidades. Es importante tener en cuenta, que dada su metodología de evaluación, este es el sector con mayores incertidumbres en la estimación de emisiones.

El inventario de emisiones del Área Metropolitana de Monterrey indica que en el 2005 se emitieron del orden de 910 mil toneladas de contaminantes al aire, destacándose que el 56% correspondieron a monóxido de carbono, 17% a partículas, 12% a compuestos orgánicos volátiles, 7% a óxidos de nitrógeno, y 6% a bióxido de azufre.

De acuerdo con los registros observados en el inventario de emisiones por fuentes fijas, el contaminante de mayor emisión fue el SO_2 (98%) con 59 mil toneladas de las cuales, la industria del petróleo contribuyó con el 50% y la industria química con el 24%. Por otro lado, el segundo contaminante de mayor emisión fue el NOx con 22 mil toneladas (33% del NOx emitido en el área de estudio). Las industrias que contribuyeron en mayor medida a las emisiones de NOx fueron la industria de vidrio, asfalto, petróleo y química. Respecto al material particulado, las fuentes fijas emitieron 8 mil quinientas toneladas que representaron el 13% del total. Cabe resaltar que el 60% de las emisiones de PM_{10} son de fracción $PM_{2.5}$. (ProAire Monterrey, 2008).

6. Caso de Estudio: $PM_{2.5}$ en el Área Metropolitana de Monterrey

6.1 Aspectos generales del área de estudio

La Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM) está conformada por Monterrey y otros 11 municipios, los cuales albergan en su conjunto alrededor de 4,400,000 habitantes, constituyéndose por su población como la tercera área metropolitana de mayor tamaño en el país. Alrededor del 80% de la población se concentra en los municipios de Monterrey, Escobedo, Guadalupe, Apodaca, San Nicolás de los Garza y Juárez.

La ZMM es el principal centro de actividad industrial, comercial y de servicios en el norte del país, núcleo de importantes corporaciones de importancia nacional e internacional. Es también uno de los principales centros de atracción de población del país debido a su amplia oferta cultural y educativa, sus oportunidades de empleo y alto nivel de desarrollo, además de su cercanía a los Estados Unidos.

En el año 2012, la ZMM alcanzó un PIB de 130,700 millones de dólares. La región, caracterizada por su espíritu emprendedor y desarrollo empresarial, es considerada la capital industrial de México y concentra el 26.3% de la producción industrial del país. La ZMM es sede de grupos empresariales importantes a nivel nacional. El desarrollo económico de la ZMM ha sido impulsado por la actividad industrial y de servicios. El sector servicios proporciona el 42.2% de las plazas de empleo, la industria manufacturera el 16.7%, las actividades agropecuarias el 12.9% y la construcción el 8.4%. En el primer trimestre de 2018, la tasa de desocupación del estado fue del 3.5%, el menor de los últimos 13 años.

En el contexto del desarrollo de la actividad empresarial y la atracción de población, el desarrollo de alternativas de transportes sostenibles y eficientes resulta de particular importancia para mantener altos niveles de productividad. En el caso particular de la ZMM, la región evidencia la influencia del modelo de desarrollo de los Estados Unidos que da alta prioridad al transporte privado. En el periodo 1995 – 2005 el porcentaje de viajes en transporte público cayó del 64% al 45%, mientras que los viajes en automóviles particulares aumentaron del 27% al 41%. Más allá, la tenencia de automóviles particulares continúa siendo aspiracional y símbolo de estatus, mientras que el transporte público recibe bajas calificaciones en la percepción de servicio de los usuarios. Para el año 2016, la ZMM alcanzó un registro de 1.7 millones de vehículos motorizados incluyendo vehículos privados, de carga y de transporte público, en un volumen vehicular en aumento desde 1980 cuando se contaba con cerca de 200,000 unidades. El aumento en el volumen vehicular ha implicado también el incremento en los tiempos de traslado los cuales son mayores a 1 hora para el 57% de los habitantes de la ZMM (ibid).

En este contexto, la ZMM enfrenta grandes desafíos en relación a la gestión de la calidad del aire. Las emisiones de la actividad industrial y de transporte, sumada a las altas temperaturas y una tendencia a la estabilidad atmosférica resultan en continuas excedencias a las normas de calidad del aire, particularmente por PM_{10}. Monterrey se encuentra entre las ciudades de Latinoamérica con los mayores niveles de contaminación del aire, principalmente en relación con altas concentraciones de partículas respirables con severos efectos en la salud. Desde el año 2000, la concentración promedio anual de PM_{10} ha excedido los 40 $\mu g/m^3$, en el año 2015, la concentración promedio anual de PM_{10} en Monterrey fue de 68.4 $\mu g/m^3$ (Secretaría de Desarrollo Sustentable de Nuevo León, 2016). Más allá, en

época invernal, con la presencia de frentes fríos del norte que favorecen la estabilidad atmosférica, se activan las alertas por contaminación que implican la aplicación de medidas de protección a la salud, y restricción en el desarrollo de actividades industriales y de transporte (ibid).

Los trabajos de este estudio buscan caracterizar la problemática de contaminación del aire en esta ZMM y brindad bases para identificar alternativas para la reducción de emisiones y mejora de la calidad del aire.

7. Metodología

7.1 Ejercicio de modelación con HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model)

Con la finalidad de tener una perspectiva general de la dispersión y trayectorias de las plumas generadas en una fuente fija ubicada dentro del AMM, se realizaron diversos ejercicios de modelación utilizando el modelo Híbrido de Trayectoria Integrada Lagrangiana de Partícula Única (HYSPLIT por sus siglas en inglés), desarrollado por la Administración Nacional de Océano y Atmósfera de los Estados Unidos de Norteamérica (NOAA por sus siglas en inglés) y la oficina de Meteorología de Australia.

Por tal motivo, se probaron diferentes bases de datos de meteorología que HYSPLIT puede incorporar para calcular trayectorias y dispersión; observando que los mejores resultados se obtuvieron con las salidas del modelo NARR (North American Regional Reanalysis) cuando éstas fueron comparadas contra mediciones de dirección de viento obtenidos mediante las estaciones de monitoreo de la red de calidad del aire. Las características de la base de datos meteorológica de NARR consisten en que forman parte del análisis global de meteorología que los Centros Nacionales de Predicción Ambiental y el Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCEP y NCAR respectivamente por sus siglas en inglés) los cuales se corren sobre la región de Norteamérica. El modelo NARR utiliza el modelo NCEP Eta que consta de celdas de 35 km/45 capas, junto con el Sistema Regional de Asimilación de Datos (RDAS), el cual asimila precipitación con otras variables, mejorando sustancialmente la exactitud de la temperatura, vientos y precipitación.

Para las corridas que se realizaron sobre el AMM, se seleccionó el día 04 de junio de 2018 debido a que fue el día en el que se obtuvieron muestras de $PM_{2.5}$ de manera simultánea en los sitios de San Juan, Universidad y García.

Los detalles de las corridas realizadas fueron las siguientes:

- Información Meteorológica: NARR (North American Regional Reanalysis 12km, pressure US, 05/2007)
- Día-Hora de liberación: 04 de junio 2018 -12:00 Hora Local, (17:00h UTC del 04-jun-18)
- Tipo de liberación: Descarga de corta duración (<24h)
- Ubicación de las fuentes: Refinería-Cadereyta (sitio sureste: 25.59041111N, 99.95022778W), Industria 1 ubicado en (sitio centro: 25.72984167N, 100.3031639W) e Industria 2 ubicado en (sitio noroeste: 25.76648889N, 100.5480111W)
- Liberación más alta de la fuente: 50 metros sobre la superficie (mAGL por sus siglas en inglés)
- Liberación más baja de la fuente: 0 mAGL
- Cantidad liberada: 1000 kg/h
- Duración de la descarga: 1.0 h
- Duración Total de la simulación: 24 h
- Imágenes presentadas en promedios de simulación: 6 h por cada imagen
- Altura promedio de la capa de simulación: 100 mAGL

Los resultados obtenidos a partir de HYSPLIT en los tres sitios, se compararon con las rosas de vientos obtenidas de mediciones para esa fecha.

7.2 Análisis de datos históricos de la calidad del aire en el AMM

Se construyeron series de tiempo, rosas de viento y correlaciones de variables meteorológicas y contaminantes atmosféricos para conocer la estacionalidad de los contaminantes y las concentraciones máximas y mínimas de $PM_{2.5}$ durante los años 2014-2016. La información utilizada para este análisis fue proporcionada por la Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (CGCSA-INECC), y corresponden a datos generados en estaciones automáticas de la red de Monterrey-Nuevo León para los años de 2014-2016 con datos validados y con una resolución temporal de promedios horarios.

Las rosas de viento permitieron conocer históricamente la predominancia de los vientos a lo largo del periodo 2014-2016 y distinguir patrones característicos de la dispersión de contaminantes “viento arriba” y “viento abajo” de la AMM. Esto contribuyó a la toma de decisiones en la selección de sitios potenciales para muestrear $PM_{2.5}$ durante la campaña piloto, así como, identificar la dirección en la que el viento dispersa las plumas contaminantes.

Adicionalmente se descargaron electrónicamente las bases de datos de calidad del aire y meteorología del Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire

(SINAICA), para la red de monitoreo de Monterrey-Nuevo León, obteniendo datos que corresponden a la semana en la que se realizó la campaña piloto de campo (04-09 de junio de 2018). Esto permitió asociar los resultados obtenidos de la especiación de las partículas $PM_{2.5}$ con las variables registradas en las diferentes estaciones de la red de monitoreo de Nuevo León.

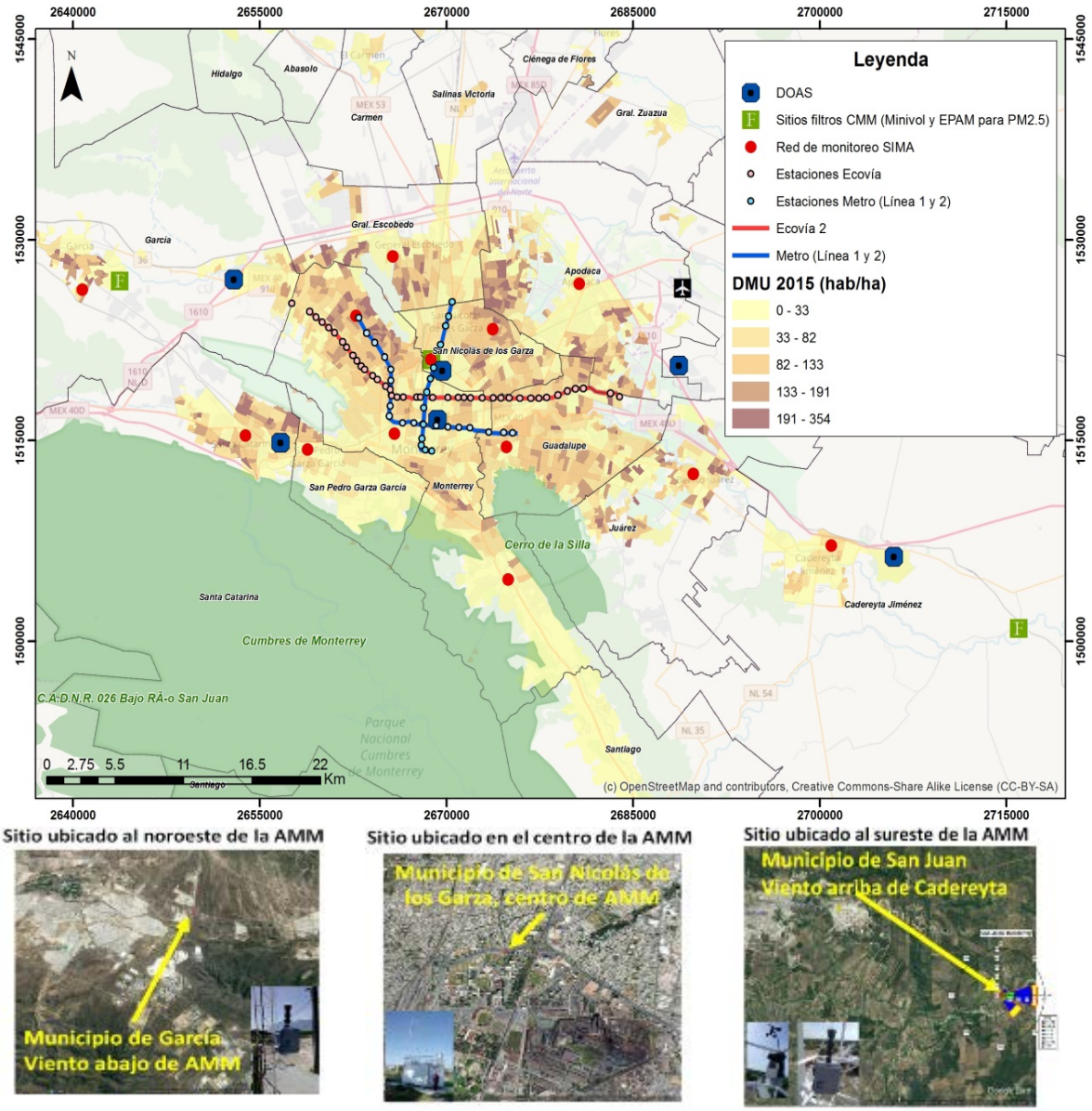
7.3 Diseño y realización de campaña de monitoreo de $PM_{2.5}$ en el AMM

Durante la campaña realizada del 04 al 09 de junio de 2018 en el AMM, el Centro Mario Molina, en conjunto con la Dirección de Gestión Integral de la Calidad del Aire de Nuevo León, y con el apoyo de la Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental del INECC, así como del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México, y la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional, se monitoreó la calidad del aire en diferentes puntos de la región.

La selección de los sitios en donde se desplegaron los equipos de monitoreo de $PM_{2.5}$ (MiniVol) consistió en un análisis previo de los datos de dirección e intensidad de vientos así como de los ejercicios de modelación utilizando el modelo HYSPLIT para distinguir patrones típicos de transporte y transformación en las diferentes temporadas del año.

Una vez presentes en el AMM, se colocaron muestreadores de $PM_{2.5}$ en los municipios de San Juan y en García; el primero corresponde a un sitio ubicado al sureste de la AMM (región con concentraciones de fondo, ubicado “viento arriba” de la emisión de la refinería de Cadereyta); y el segundo corresponde a una sitio ubicado al noroeste de la AMM (sitio receptor o viento abajo de las concentraciones de contaminantes generadas dentro del AMM así como aquellas provenientes del sector Este de Nuevo León. Se colocó de manera intermitente un tercer sitio de monitoreo durante 2 días de la semana de mediciones, en el sitio de Universidad que corresponde al municipio de San Nicolás de los Garza y está situado en la parte centro de la AMM **(**Mapa 4**)**.

Mapa 4 Ubicación de los sitios fijos para el monitoreo de $PM_{2.5}$ en García (municipio de García), Universidad (municipio San Nicolás) y San Juan (municipio de Cadereyta).



En la selección de los sitios para colocar los muestreadores de $PM_{2.5}$ se tomaron en cuenta factores como seguridad de los equipos y representatividad de la muestras quedando libres de barreras físicas que impidieran una libre toma de muestra de tal forma que midieran los contaminantes primarios y secundarios presentes en el sitio (agrícola, industrial, vehicular y concentraciones de fondo). Adicionalmente a los datos obtenidos directamente de los Minivol, se construyó una base de datos con la información de las estaciones automáticas de la red de Monterrey-Nuevo León.

La infraestructura con la que realizaron las mediciones de $PM_{2.5}$ en sitios fijos, se describe a continuación:

7.3.1 Sitio San Juan, Cadereyta-Nuevo León

La localidad de San Juan, se ubica en el municipio de Cadereyta Nuevo León, al sureste de la AMM, con coordenadas: 25°32'30.45"N, 99°50'29.81"W, en el cual se utilizaron para la toma de muestra de $PM_{2.5}$, equipos Minivol de la marca AirMetrics, modelo: TAS-5.0, con filtros de teflón y cuarzo de 47 mm. Adicionalmente se instaló una estación meteorológica portátil marca DAVIS, modelo: Vantage-PRO.

El objetivo de tomar muestras de $PM_{2.5}$ en ese sitos fue el de obtener un perfil de las concentraciones de fondo de partículas $PM_{2.5}$, por lo que se montaron los equipos a una altura aproximada de 30 metros, sobre un tanque de agua elevado, en el patio de la escuela primaria "José M. González", (Figura 36)

Figura 36 Ubicación de muestreador MiniVol para $PM_{2.5}$ y meteorología en sitio San Juan, Cadereyta Nuevo León.

a) b) c)

7.3.2 Sitio Universidad

El sitio universidad se ubicó sobre el techo de la estación de monitoreo atmosférico de la Red de calidad del aire de Monterrey, cuya identificación corresponde a Universidad, debido a que se encuentra dentro de las instalaciones de la Universidad Nacional Autónoma de Nuevo León (UANL) en el municipio de San Nicolás de los Garza, con las siguientes coordenadas 25° 43' 48'' N, 100° 18' 36'' W. El equipo que se instaló en este sitio correspondió a un monitor continuo de $PM_{2.5}$, marca SKC, modelo EPAM 7500, con medio de colección de filtros de teflón y cuarzo de 47mm. Dicho equipo se ubicó sobre el toldo de la estación de monitoreo

atmosférico de la red de Monterrey. El objetivo es obtener un perfil de las concentraciones de $PM_{2.5}$ dentro de la AMM para conocer las concentraciones debidas a fuentes fijas y móviles dentro del AMM. Es importante señalar que solo se tomaron muestras de $PM_{2.5}$ para los días 6 y 7 de junio de 2018. (Ver Figura 37)

Figura 37 Ubicación de muestreador EPAM 7500 para $PM_{2.5}$ ubicado en sitio Universidad, en la estación de monitoreo atmosférico de Universidad del municipio de San Nicolás de los Garza.

a) b) c)

7.3.3 Sitio García

En el municipio de García que se localiza al noroeste de la AMM (próximo a Saltillo) se instaló un equipo Minivol para $PM_{2.5}$ de la marca AirMetrics, modelo TAS-5.0, con filtros de teflón y cuarzo de 47 mm. El sitio se ubicó sobre la azotea de una caseta de vigilancia (25°45'59.83"N, 100°32'39.63"W) a una altura aproximada de 4-5 metros de altura sobre la superficie, en la periferia de una empresa dedicada a la fabricación de carbonato, bicarbonato de sodio, cloruro de calcio y cloruro de sodio. El objetivo de tomar muestras de $PM_{2.5}$ en este sitio se centró en cuantificar y especiar las partículas provenientes de fuentes industriales y móviles generadas en el sito, así como las transportadas y acumuladas desde el centro de la AMM hasta este lugar (Figura 38).

Figura 38 Ubicación de muestreador MiniVol para $PM_{2.5}$ en sitio García, en municipio de García Nuevo León.

a) b) c)

7.4 Medición de NO_2 y SO_2 utilizando la técnica DOAS-Mobile

La técnica de medición DOAS se basa en la interacción de la luz con la materia descrita cuantitativamente por la ley de Lambert-Beer. Este método ha sido ampliamente utilizado durante décadas pasadas y es capaz de cuantificar varias moléculas simultáneamente, proveer resultados en tiempo real y con buena resolución en tiempo. Adicionalmente, la técnica de medición no es invasiva, es precisa y con flexibilidad suficiente para ser utilizada en diferentes condiciones y ambientes (Platt y Stutz, 2008).

La FQ-UNAM utilizó un equipo óptico (DOAS-mobile) instalado en un automóvil compacto de la DGICANL, que realizó recorridos en el perímetro de las diferentes industrias identificadas como fuentes importantes en la emisión de NO_2 y SO_2, para identificar la dirección que siguen las plumas de contaminantes que emanan de cada una de las chimeneas correspondientes a una industria en particular.

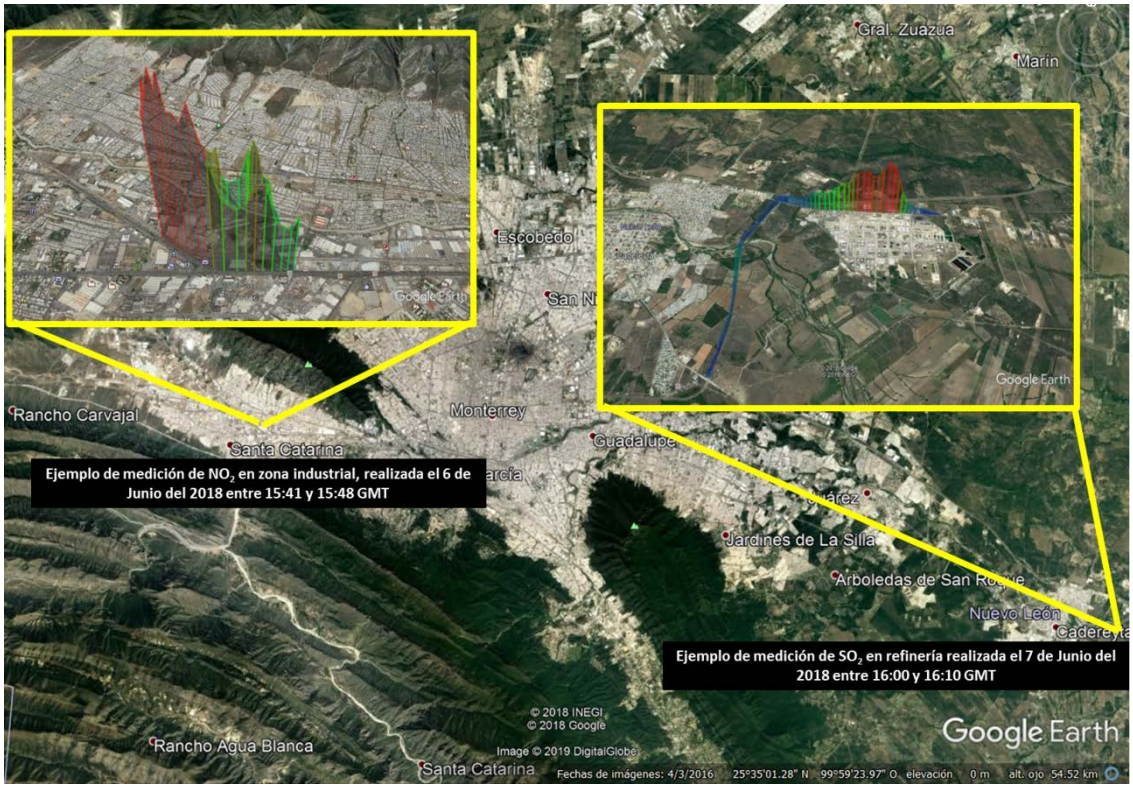
Para este tipo de mediciones se llevaron a cabo lecturas en diferentes sitios del AMM. Los sitios en donde se llevaron a cabo mediciones de DOAS se presentan en la Tabla 8 y Mapa 5.

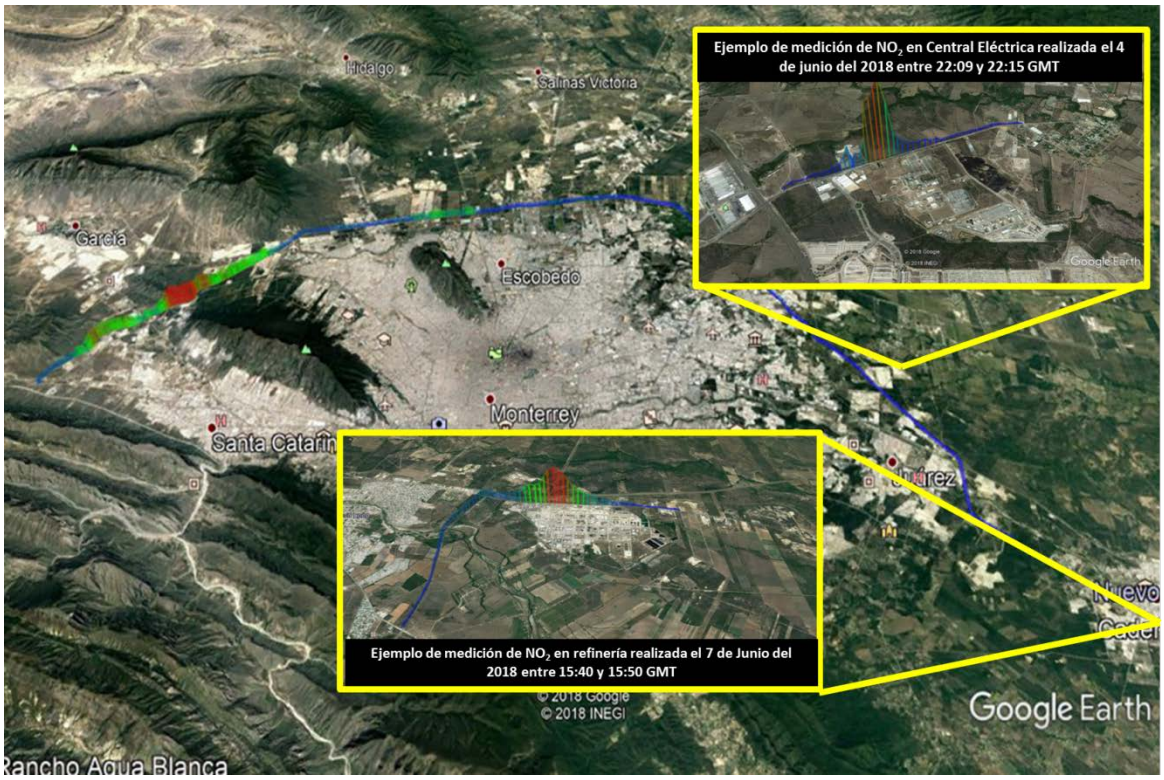
Tabla 8 Sitios con su localización (latitud y longitud) en donde se llevaron a cabo mediciones DOAS.

Sitio	Latitud	Longitud
Refinería Cadereyta	25.586787	-99.943492
Hunialá CT	25.722086	-100.103461
Industria	25.689975	-100.306981
Industria	25.705788	-100.308211
Industria	25.721542	-100.299662

Sitio	Latitud	Longitud
Industria	25.674922	-100.437743
Industria	25.743185	-100.23631
Industria	25.777941	-100.179571
Mty Centro	25.674636	-100.321092

Mapa 5 Ubicación de los sitios medidos con la técnica DOAS-mobile durante la campaña de monitoreo en el AMM.

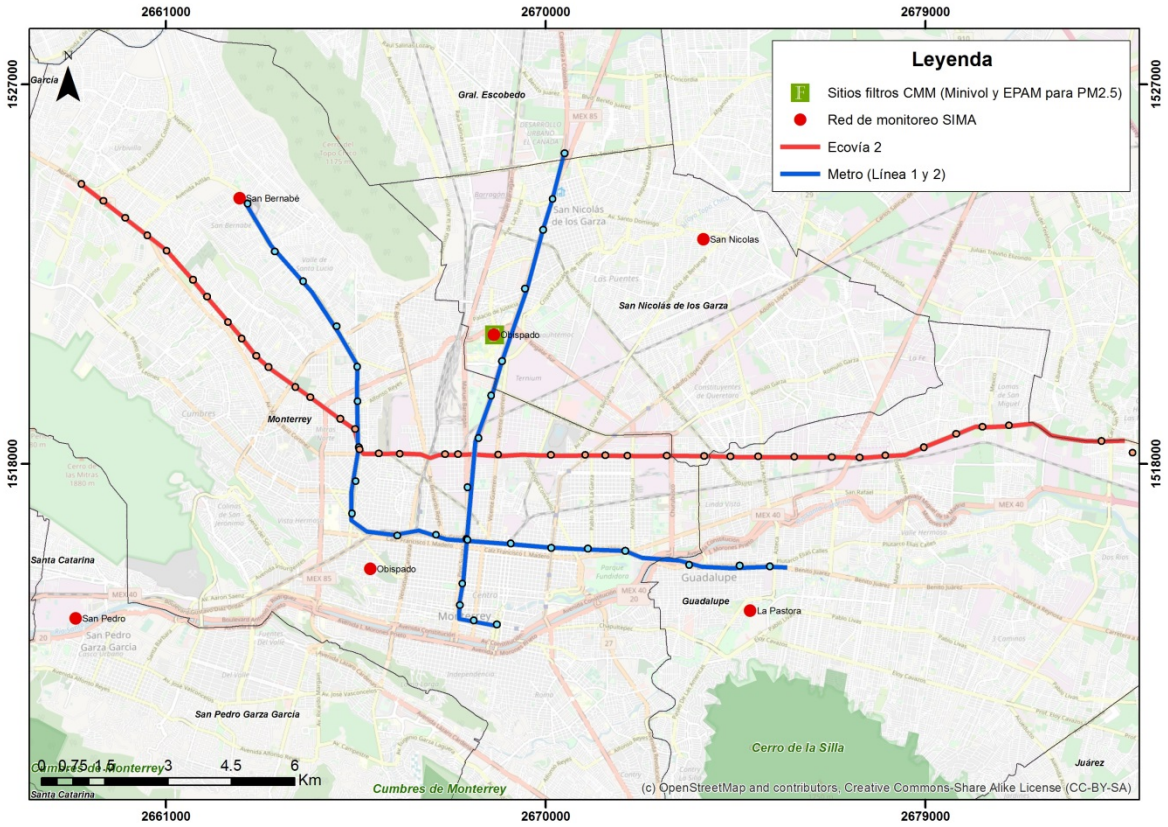




7.5 Medición de $PM_{2.5}$ para evaluar concentraciones en transporte público

El CMM realizó mediciones de concentraciones con equipos de mediano y bajo costo para la cuantificación de $PM_{2.5}$ en diferentes tipos de transporte de pasajeros empleando monitores de mediano y bajo costo (1 equipo EPAM-7500- SKC, y 3 equipos Thermo PDR-1500), viajando en el interior del transporte público con los equipos en operación para colectar las muestras de contaminantes. Los transportes monitoreados fueron: Eco-vía y Metrorrey)

Mapa 6 Mapa general de rutas para medir $PM_{2.5}$ para evaluar concentraciones en transporte público

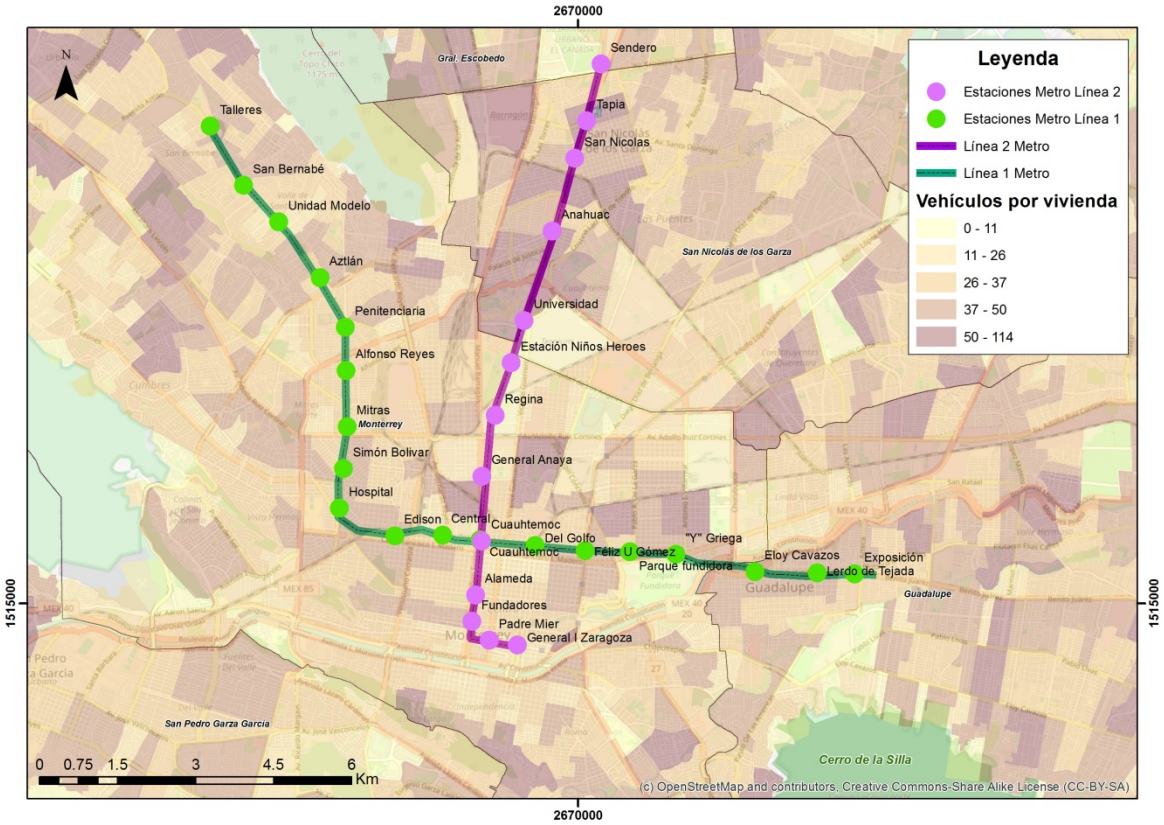


Este muestreo se enfocó en seleccionar vías primarias con mayor congestionamiento y/o mayor afluencia por la población, que también incluyeran zonas cercanas a industria ostensiblemente contaminante y que estuvieran próximas a estaciones de monitoreo. Por lo que se realizó la toma de muestras en horas pico (07:00 a 09:00 horas y de 17:00 -19:00 horas aproximadamente).

7.6 Metrorrey y Línea 1 y 2

En cuanto al monitoreo del Sistema de Transporte Colectivo “Metro-Rey”, se utilizaron 2 equipos PDR para medición continua de partículas. El objetivo fue evaluar la concentraciones a partículas en transporte público La distancia que comprende la Línea 1 de Metro-Rey es de aproximadamente 18.8km (19 estaciones), mientras que la distancia que tiene la Líneas 2 es de aproximadamente 13.7 Km con 13 estaciones (Figura 39).

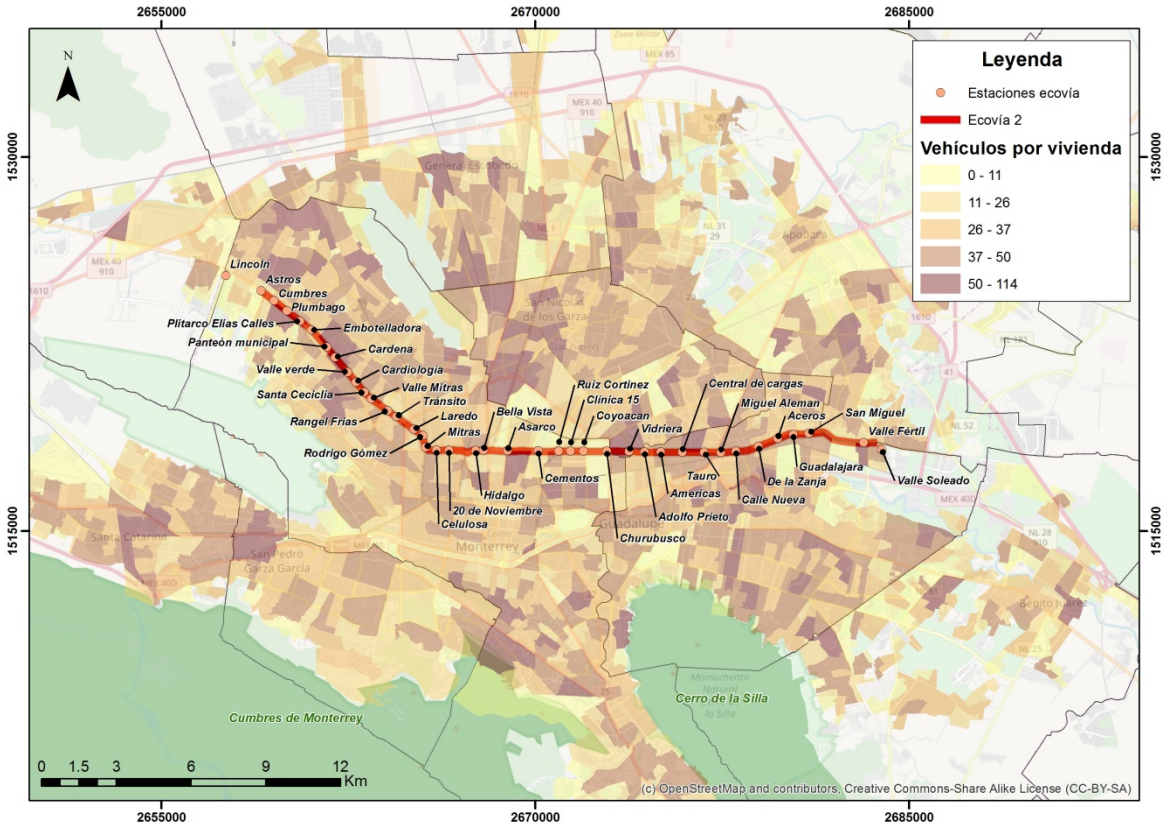
Figura 39 Líneas y estaciones del Metro-Rey que operan en el AMM



7.7 Ecovía Monterrey

En el caso de los recorridos en la Ecovía se midieron partículas $PM_{2.5}$, con equipos PDR-1500 y EPAM 7500. La distancia de la Ecovía es de aproximadamente 30.1 Km y cuenta con 40 estaciones que recorren de Este a Oeste o viceversa el AMM. Este transporte se muestra en la Figura 40.

Figura 40 Ruta que sigue el transporte de masivo de pasajeros Eco-vía en el AMM



Para el desarrollo del monitoreo de partículas en este medio de transporte se emplearon los siguientes recursos y actividades:

- Equipos de dos personas portando el equipo de monitoreo para patículas $PM_{2.5}$ (PDR-1500) y dispositivo GPS para mapeo de trayecto, simulando ser usuarios comunes de los sistemas de transporte colectivo.
- Realización de recorridos completos (ida y vuelta)
- Monitoreo en horarios críticos y de mayor demanda, mañanas y tardes
- Periodos de muestreo de 2 horas aproximadamente
- Duración de la campaña de medición de 1 semana
- Empleo de formatos de campo

En cuanto a las tecnologías de vehículos con las que cuenta Metrorrey y Ecovía resaltan trenes eléctricos y autobuses a gas natural. (Figura 41)

Figura 41 Tecnologías de vehículos en Metro y Ecovía de Monterrey

a) Metrorrey

Trenes eléctricos

b) Ecovía

Autobuses a gas Natural

7.8 Equipo utilizado

Los equipos PDR 1500 y EPAM 7500 que se muestran en la Figura 42 fueron utilizados para el monitoreo de partículas $PM_{2.5}$ en transporte público de Monterrey. Ambos equipos funcionan bajo el principio óptico que consiste en hacer pasar un infrarrojo sobre un fotodetector el cual mide la dispersión de lúz producida por las partículas; dicha dispersión es inmediatamente traducida a una lectura de concentración en $\mu g/m^3$.

Figura 42 Tecnologías de vehículos en Metro y Ecovía de Monterrey

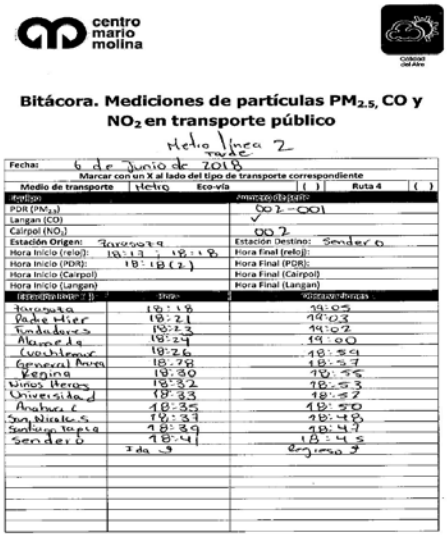
a) EPAM 7500 para $PM_{2.5}$ B) PDR para partículas $PM_{2.5}$

El personal técnico con hojas de campo y equipo de monitoreo hacían la función de pasajeros y tomaban las lecturas de $PM_{2.5}$ dentro de los vehículos (Figura 43)

Figura 43 Técnico con equipo de monitoreo en transporte público

Cada uno de los técnicos contaban con hojas de campo y bitácoras donde realizaban anotaciones de las hora, estación, y concentración de parada para cada tipo de transporte. La hoja de campo utilizada se muestra a continuación (ver Figura 44):

Figura 44 Ejemplo de hojas de campo usadas durante monitoreo de concentraciones en Metro Línea 2 (izquierda) y Ecovía (derecha)



centro mario molina

Bitácora. Mediciones de partículas $PM_{2.5}$, CO y NO_2 en transporte público

Metro Línea 2

Fecha: 6 de Junio de 2018

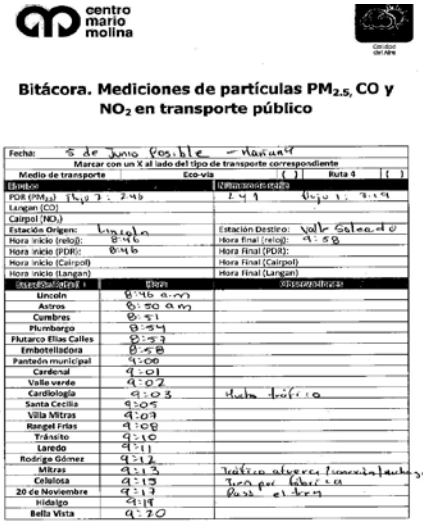
Marcar con un X al lado del tipo de transporte correspondiente

Medio de transporte: Metro | Eco-vía ( ) | Ruta 4 ( )

Equipo		Monitores de calle
PDR ($PM_{2.5}$)		002-001
Langan (CO)		
Cairpol (NO_2)		002
Estación Origen:	Tacuba	Estación Destino: Sendero
Hora Inicio (reloj):	18:13 : 18:18	Hora Final (reloj):
Hora Inicio (PDR):	18:18 (2)	Hora Final (PDR):
Hora Inicio (Cairpol)		Hora Final (Cairpol)
Hora Inicio (Langan)		Hora Final (Langan)

Estación/Parada	Hora	Observaciones
Tacuba	18:18	19:05
Panteón	18:21	19:03
Fundadores	18:23	19:02
Alameda	18:24	19:00
Cuauhtémoc	18:26	18:54
General Anaya	18:28	18:57
Reyna	18:30	18:55
Niños Heroes	18:32	18:53
Universidad	18:33	18:57
Andador	18:35	18:50
San Nicolás	18:37	18:48
Santuario Tepito	18:39	18:47
Sendero	18:41	18:45
	Ida 9	Regreso 9

Hoja de campo Metro Línea 2



centro mario molina

Bitácora. Mediciones de partículas $PM_{2.5}$, CO y NO_2 en transporte público

Fecha: 5 de Junio Posible – Mañana

Marcar con un X al lado del tipo de transporte correspondiente

Medio de transporte: Eco-vía ( ) | Ruta 4 ( )

Equipo		Monitores de calle
PDR ($PM_{2.5}$)	7:43 : 7:46	2:49 Apx 3:19
Langan (CO)		
Cairpol (NO_2)		
Estación Origen:	Lincoln	Estación Destino: Valle Soleado
Hora inicio (reloj):	8:46	Hora final (reloj): 9:58
Hora inicio (PDR):	8:46	Hora Final (PDR):
Hora inicio (Cairpol)		Hora Final (Cairpol)
Hora inicio (Langan)		Hora Final (Langan)

Estación/Parada	Hora	Observaciones
Lincoln	8:46 a.m	
Astros	8:50 a.m	
Cumbres	8:51	
Plumbargo	8:54	
Plutarco Elías Calles	8:57	
Embotelladora	8:58	
Panteón municipal	9:00	
Cardenal	9:01	
Valle verde	9:02	
Cardiología	9:03	Hubo tráfico
Santa Cecilia	9:05	
Villa Mitras	9:07	
Rangel Frías	9:08	
Tránsito	9:10	
Laredo	9:11	
Rodrigo Gómez	9:12	
Mitras	9:13	Tráfico alrededor Tramo fatal
Celulosa	9:15	Tramo por fabrica
20 de Noviembre	9:17	Pasa el tren
Hidalgo	9:19	
Bella Vista	9:20	

Hoja de campo Ecovía

8. Resultados

8.1 Ejercicio de modelación con HYSPLIT para la campaña de monitoreo

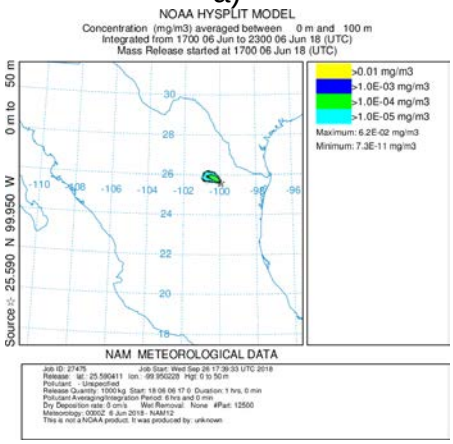
A partir de los resultados de modelación con HYSPLIT usando datos meteorológicos del modelo NARR para el día 06 junio de 2018, se obtuvieron las simulaciones que se muestran a continuación para tres diferentes sitios de liberación de la pluma: a) Refinería Cadereyta (sureste de la AMM), b) Industria ubicada en el centro del AMM, y c) Industria ubicada al noroeste de la AMM. (Ver Figura 45)

En la Figura 45 se observa que la simulación de la pluma liberada de una industria dedicada a la refinación de petróleo la cual tiene una dispersión inicial a las 12:00h del 06 de julio de 2018 en sentido noroeste (Figura 45a), con concentraciones alrededor 0.1 µg/m^3 a partir de una liberación simulada de partículas de 1 ton/h liberada durante 1 hora. Esta simulación permite distinguir que la dispersión de las emisiones liberadas desde la refinería de Cadereyta, para ese día, se desplazaron hacia el noroeste de la región, impactando a la zona centro del AMM (Figura 45b-45d) con concentraciones aproximadas a las 0.01 µg/m^3; permitiendo con esto conocer que el patrón de vientos en ese día sopló del este hacia el noroeste, arrastrando las emisiones generadas en Cadereyta hacia dentro del AMM.

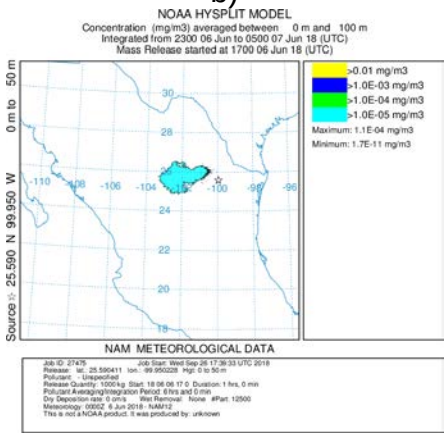
Figura 45 Modelación con HYSPLIT-NARR, para el día 06 de junio de 2018, a las 12:00h (Hora Local), desde Refinería-Cadereyta

Dispersión de emisión desde Refinería-Cadereyta (06 junio 2018, 12:00 Hora Local)

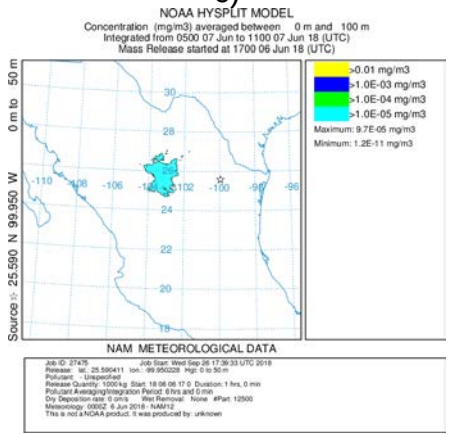
a)



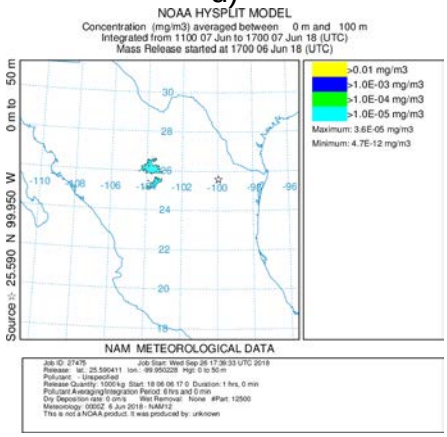
b)



c)



d)

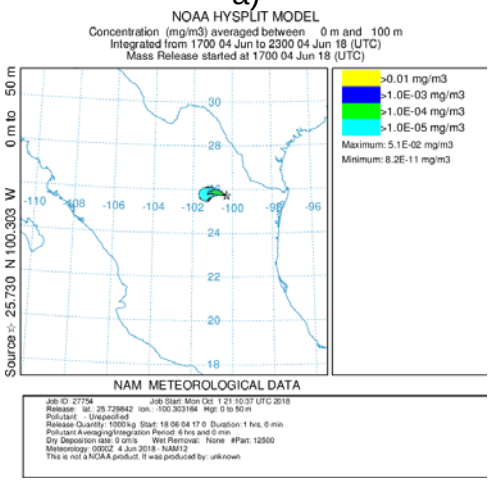


Para el caso de la liberación simulada desde una industria que se ubica en el centro de la AMM (municipio de San Nicolás de los Garza), se observa un patrón similar al de Cadereyta en donde la dispersión de la pluma simulada a las 12:00h (hora local) se desplaza hacia el sector este de la AMM con concentraciones que van alrededor de los 0.1 µg/m^3 (Figura 46a), y conforme transcurre el tiempo continúan su trayectoria hacia ese mismo sector con concentraciones diluidas que alcanzan los 0.01 µg/m^3 (Figura 46b – 46d)

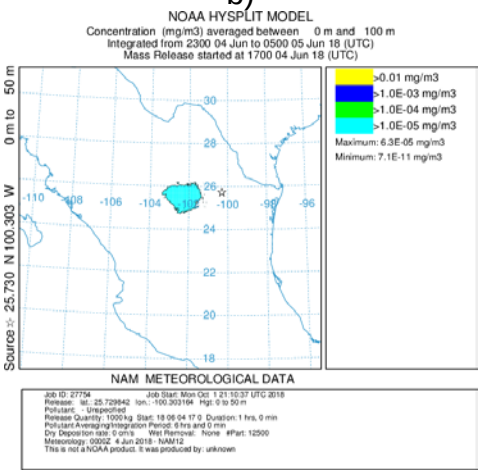
Figura 46 Modelación con HYSPLIT-NARR, para el día 06 de junio de 2018, a las 12:00h (Hora Local), desde una industria ubicada en el centro de la AMM

Dispersión de emisión (06 junio 2018, 12:00 Hora Local)

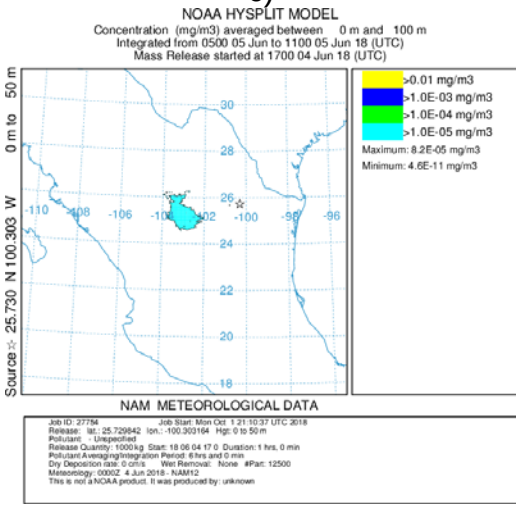
a)



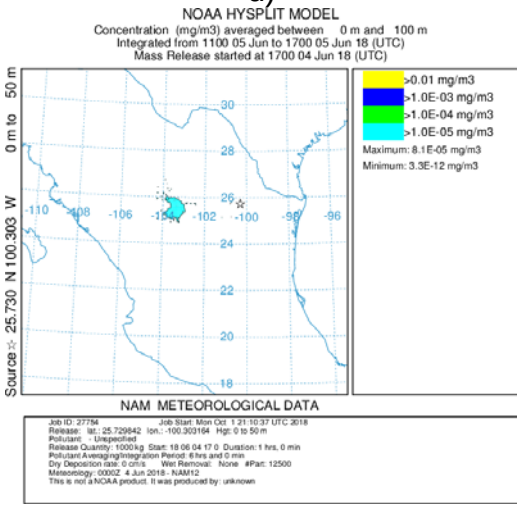
b)



c)



d)



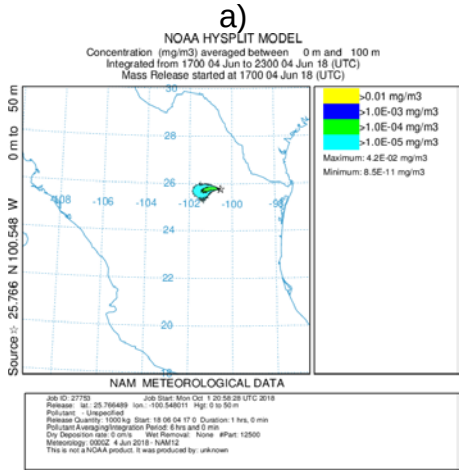
En cuanto a la simulación de la pluma liberada desde una industria ubicada al noroeste (noroeste del AMM) coincide con los dos casos anteriores de Refinería Cadereyta e industria de la Figura 45, en donde la trayectoria de la pluma toma rumbo hacia el sector este aparentemente impactando a Saltillo, en cuya dispersión de la pluma estaría acarreando contaminantes generados al este del AMM, posiblemente desde la región de Cadereyta, pasando por la zona centro del AMM y enriqueciéndose con emisiones que se generan en el municipio de García, cuyo giro industrial predominante son las pedreras (Figura 47a – 47d).

Los resultados de la modelación mostraron la predominancia de los vientos para un día en donde se llevaba a cabo la campaña de monitoreo, encontrando que los vientos a nivel regional soplan del sector Este y Sureste hacia el Noroeste. Con lo cual, se puede asumir que las emisiones generadas en Cadereyta y centro del AMM son transportadas hacia el municipio de García.

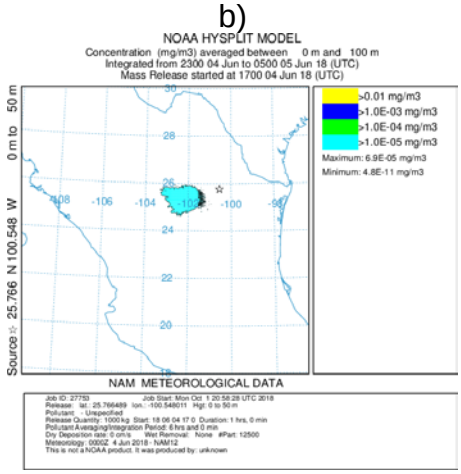
Figura 47 Modelación con HYSPLIT-NARR, para el día 06 de junio de 2018, a las 12:00h (Hora Local), desde pedrera (al noroeste de la AMM).

Dispersión de emisión (06 junio 2018, 12:00 Hora Local)

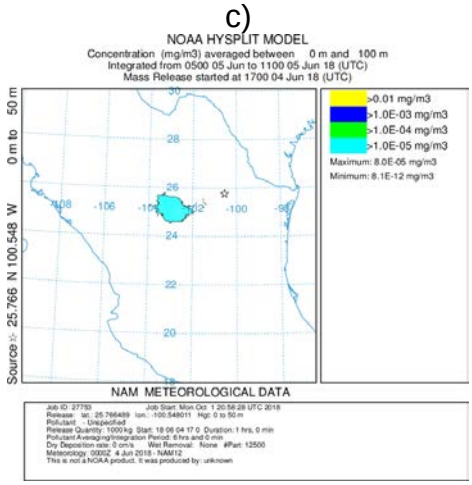
a)



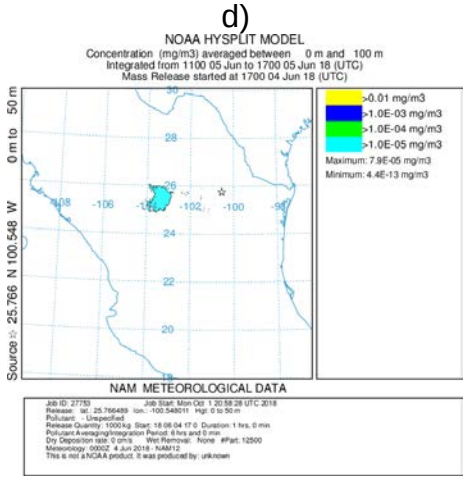
b)



c)



d)



8.2 Campaña de monitoreo para sitios fijos enfocados a $PM_{2.5}$

Las muestras colectadas para caracterizar $PM_{2.5}$ en filtros de cuarzo y teflón para García, Universidad y San Juan, se presentan a continuación con sus

correspondientes análisis químicos instrumentales realizados en los laboratorios del INECC, en donde se aprecia que se colectaron y analizaron un total de 10 filtros de teflón y 3 filtros de cuarzo (Tabla 9).

Tabla 9 Descripción de muestras y análisis realizados a $PM_{2.5}$ colectados en el AMM durante la campaña del 4-8 de junio de 2018.

Fecha	García			Universidad			San Juan		
	Tipo de filtro	Flujo (Lpm)	Análisis realizados	Tipo de filtro	Flujo (Lpm)	Análisis realizados	Tipo de filtro	Flujo (Lpm)	Análisis realizados
04jun2018	Teflón	4.7	Gravimetría	---	---	---	Teflón	4.87	Gravimetría
05jun2018	Teflón	4.5		---	---	---	Teflón	4.96	
06jun2018	Teflón	4.5	Cromatografía iónica Fosfato (PO_4^{3-}), Sulfato (SO_4^{2-}), Litio (Li^+), Sodio sol. (Na^+), Amonio (NH_4^+), Potasio (K^+), Magnesio (Mg_2^+), Calcio (Ca_2^+),	Teflón	2.5	Gravimetría	Teflón	4.88	Cromatografía iónica Fosfato (PO_4^{3-}), Sulfato (SO_4^{2-}), Litio (Li^+), Sodio sol. (Na^+), Amonio (NH_4^+), Potasio (K^+), Magnesio (Mg_2^+), Calcio (Ca_2^+)
07jun2018	Teflón	4.7	Fluorescencia de Rayos X Aluminio (Al), Silicio (Si), Azufre (S), Potasio (K), Calcio (Ca), Titanio (Ti), Vanadio (V),	Teflón	2.5	Cromatografía iónica Fosfato (PO_4^{3-}), Sulfato (SO_4^{2-}), Litio (Li^+), Sodio sol. (Na^+), Amonio (NH_4^+), Potasio (K^+), Magnesio (Mg_2^+), Calcio (Ca_2^+) Fluorescencia de Rayos X Aluminio (Al), Silicio (Si), Azufre (S), Potasio (K), Calcio (Ca), Titanio	Teflón	4.84	Fluorescencia de Rayos X Aluminio (Al), Silicio (Si), Azufre (S), Potasio (K), Calcio (Ca), Titanio (Ti), Vanadio (V), Cromo

Fecha	García			Universidad			San Juan		
	Tipo de filtro	Flujo (Lpm)	Análisis realizados	Tipo de filtro	Flujo (Lpm)	Análisis realizados	Tipo de filtro	Flujo (Lpm)	Análisis realizados
			Cromo (Cr), Manganeso (Mn), Fierro (Fe), Niquel (Ni), Cobre (Cu), Zinc, (Zn) y Plomo (Pb)			(Ti), Vanadio (V), Cromo (Cr), Manganeso (Mn), Fierro (Fe), Niquel (Ni), Cobre (Cu), Zinc, (Zn) y Plomo (Pb)			(Cr), Manganeso (Mn), Fierro (Fe), Niquel (Ni), Cobre (Cu), Zinc, (Zn) y Plomo (Pb)
08jun2018	Cuarzo	4.63	Gravimetría Carbono Orgánico Total Carbono Orgánico, Carbono Elemental y Carbono Total	Cuarzo	2.5	Gravimetría Carbono Orgánico Total Carbono Orgánico, Carbono Elemental y Carbono Total	Cuarzo	4.95	Gravimetría Carbono Orgánico Total Carbono Orgánico, Carbono Elemental y Carbono Total

Es importante señalar que el laboratorio del INECC, fue el encargado de realizar el acondicionamiento, pesaje inicial y final de las muestras.

8.3 Validación de base de datos gravimétricos

Con la finalidad de determinar la consistencia de los datos ambientales recolectados durante la campaña en los sitios fijos, se realizaron varios procedimientos para la validación de la información que aseguren su utilidad.

Nivel 0. Evaluar que los instrumentos utilizados en campo y los de laboratorio hayan funcionado de manera adecuada. En este punto se detectó que el equipo EPAM 7500 presentó algunos problemas con el correcto suministro de energía eléctrica

durante el día 07 de junio en el sitio Universidad, por lo que no fue considerado para el análisis en esa fecha.

Nivel 1. Verificar que los datos de concentración de $PM_{2.5}$ en todos los sitios cubran los siguientes requisitos:

a) Depósito no uniforme en el filtro, posible fuga,

b) Remplazo del filtro empleado debido a que se saturó provocando disminución del flujo,

c) Pérdida de la muestra a consecuencia de mala manipulación del filtro,

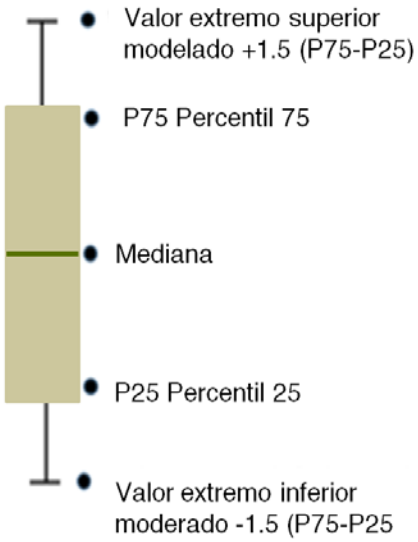
d) mal funcionamiento del muestreador.

Nivel 2. En este nivel se determinaron relaciones entre varios componentes de las $PM_{2.5}$, mediante correlaciones lineales (Vega et al. 2002)

8.4 Estadística básica, variación de la concentración promedio de 24 h de $PM_{2.5}$

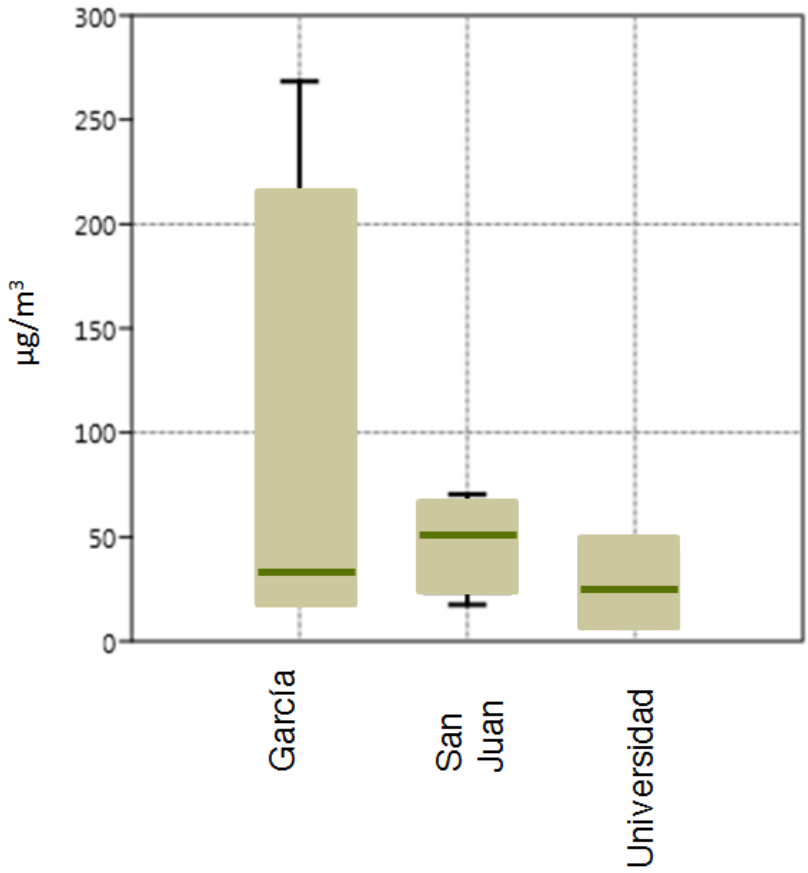
Se construyeron diagramas de caja y bigote (Figura 48) para conocer la dispersión de las mediciones, la forma de la distribución y la presencia de valores extremos de los datos colectados durante el muestreo. Los valores extremos se refieren a aquellos valores que tuvieron un comportamiento diferente en comparación con la población de datos agrupados en esa categoría. Los valores extremos moderados superiores, son aquellos que se encuentran por encima del percentil 75 (P75) más 1.5 veces la diferencia del P75-P25. Los extremos moderados inferiores son aquellos valores que se encuentran por debajo del valor de P25 menos 1.5 veces la diferencia del P75-P25 (Salgado, 1992).

Figura 48 Interpretación de diagramas de caja y bigote Fuente: Elaboración propia, modificado de Salgado 1992



La Figura 49 muestra diagramas de caja y bigote para concentraciones de $PM_{2.5}$ expresados como promedios de 24 horas, obtenidos a partir de los tres sitios fijos de monitoreo durante la campaña; observando que San Juan presenta la mediana más alta con respecto a los otros dos sitios (45.9 µg/m^3), y sus valores extremos no son tan altos, lo que indica que las concentraciones registradas en este lugar son más constantes. Sin embargo, en García donde la mediana es más pequeña que en San Juan (35.8 µg/m^3 vs 45.9 µg/m^3) se presentaron valores extremos superiores más grandes, sugiriendo que la variación en las concentraciones de $PM_{2.5}$ en ese sito puede aumentar de manera significativa pero no disminuir, ya que su valor extremo inferior es igual al percentil 25 (P25) que se mantiene alrededor de los 25 µg/m^3, mismo que representa la concentración de fondo para ese sitio durante la campaña. Cabe mencionar que en García la actividad de las pedreras incide en la oscilación de los valores extremos superiores, mientras que en San Juan la fuente principal se asocia a la refinación de petróleo, aun y cuando el sitio de monitoreo se ubicó “viento arriba” de Refinería-Cadereyta.

Figura 49 Estadística básica de $PM_{2.5}$ en los sitios fijos de muestreo para la campaña de monitoreo del 4 al 9 de junio de 2018.

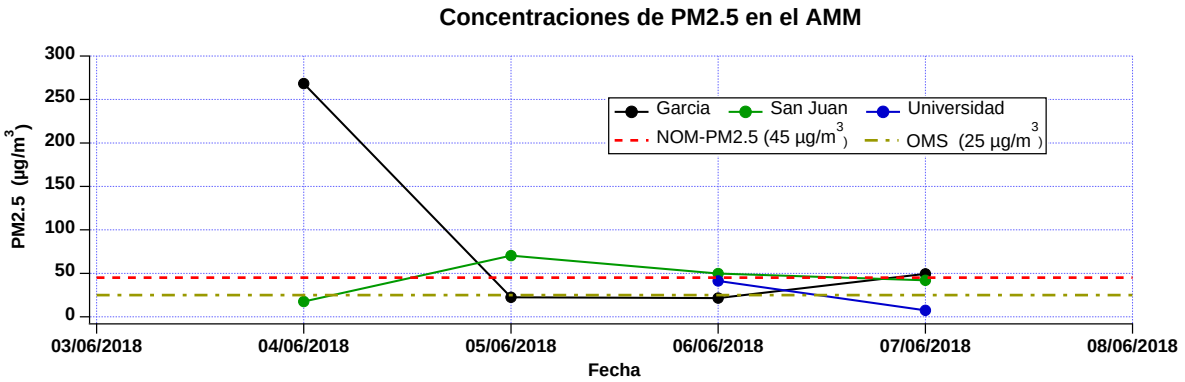


Es importante señalar que las concentraciones promedios de 24 horas para $PM_{2.5}$, se excedieron en algunas ocasiones, lo cual se menciona en el siguiente punto.

8.5 Series de tiempo de $PM_{2.5}$ en García, San Juan y Universidad

Se elaboraron series de tiempo de las muestras de $PM_{2.5}$ colectados en los sitios fijos con la finalidad de conocer el cumplimiento a la NOM-025-SSA1-2014, la cual establece la no excedencia del valor máximo permisible de 45 µg/m^3 para un periodo de 24 horas en el aire ambiente de una región. (Figura 50)

Figura 50 Series de tiempo para $PM_{2.5}$ durante la campaña de monitoreo del 4-9 de junio de 2018 en el AMM.



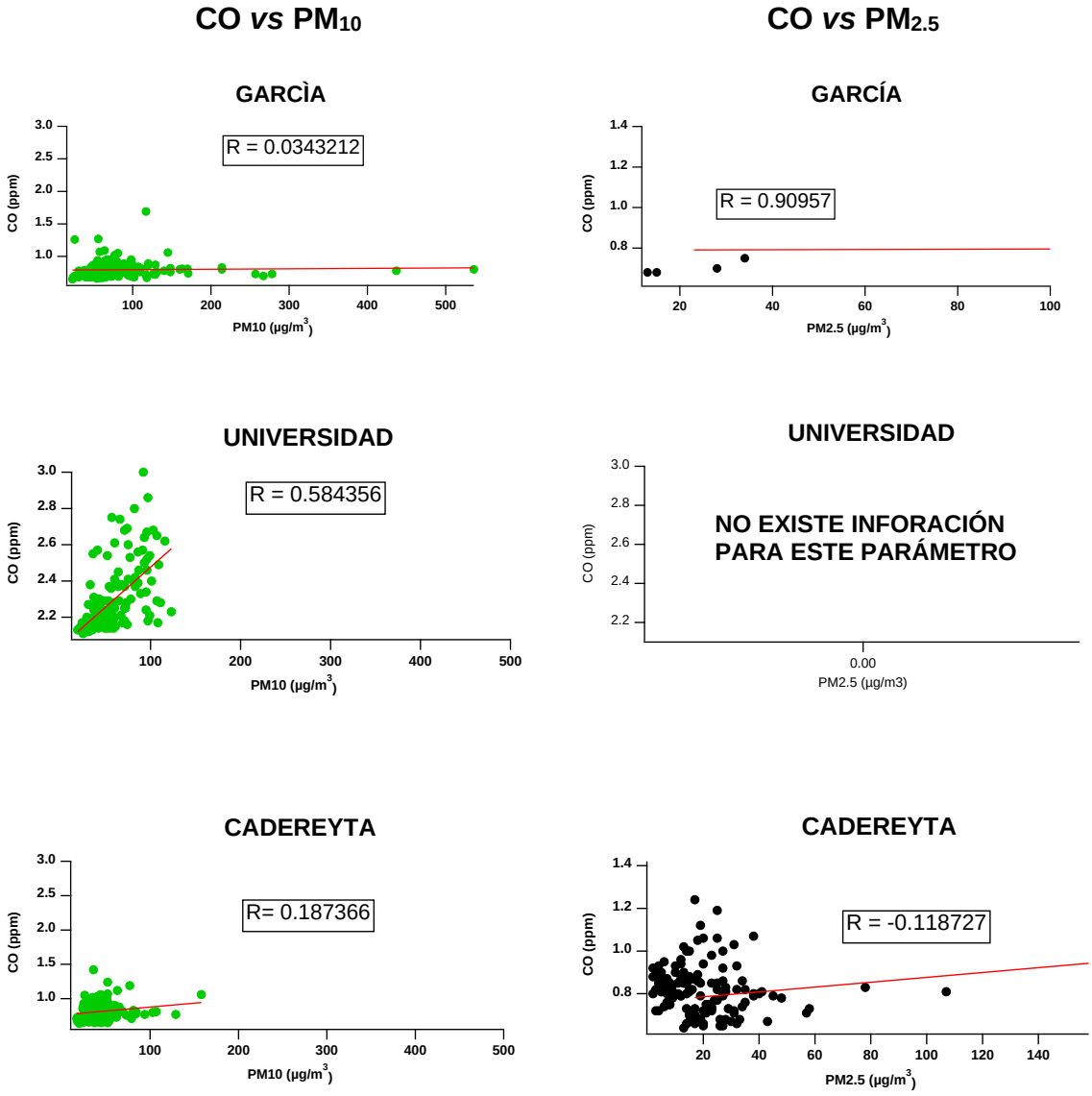
La serie de tiempo que se muestra en la Figura 50, presenta excedencias a la NOM-025-SSA1-2014 en García para los días 04 y 07 de junio de 2018 con valores de 268.4 y 49.4 µg/m^3 de $PM_{2.5}$ respectivamente. Mientras que, en San Juan las excedencias se presentaron para los días 05 y 06 de junio con valores de 70.5 y 49.8 µg/m^3. Por su parte el sitio de Universidad en ninguna de las dos ocasiones que se tomó muestra, se excedió el valor de la norma.

Es importante resaltar que los días en los que se presentaron las excedencias a la norma en García y en San Juan no coincidieron entre ellos, indicando que las concentraciones de $PM_{2.5}$ durante la semana de muestreo tuvieron una influencia más local que sinóptica en términos de la distribución de los contaminantes atmosféricos.

8.6 Correlaciones entre contaminantes

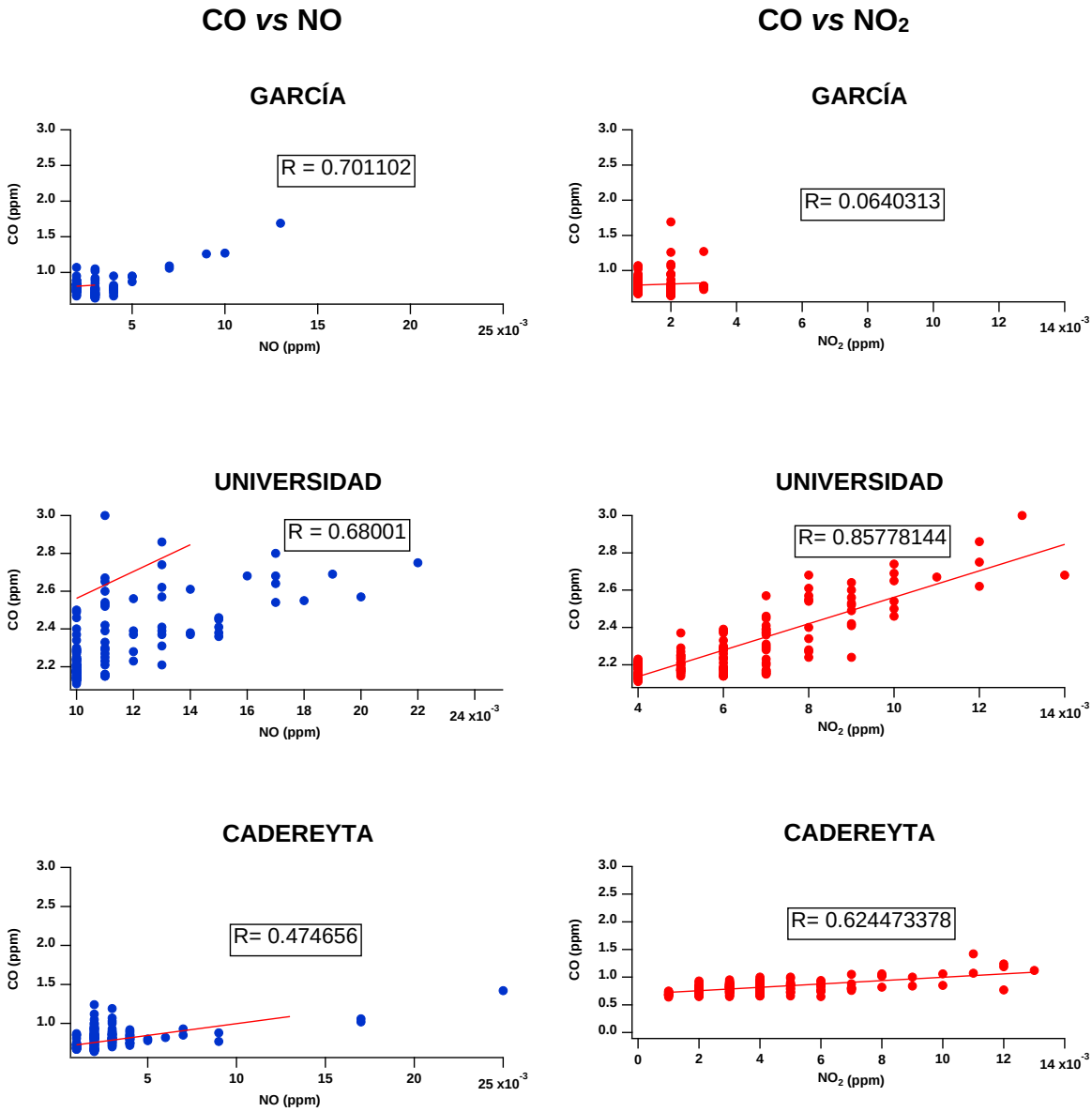
Con la finalidad de encontrar posibles correlaciones entre gases contaminantes y $PM_{2.5}$ en el AMM que permitan asociar las concentraciones atmosféricas a un tipo de fuente en particular, se realizaron correlaciones lineales a partir de los datos de las estaciones automáticas de Cadereyta, García y Universidad, para el mismo periodo en el que se desarrolló la campaña de monitoreo. Sin embargo, cuando se realizaron las correlaciones entre CO vs PM_{10} los valores quedaron por debajo de 0.6, indicando que no existe una correlación entre estas especies para ninguno de los sitios estudiados; mientras que en la correlación entre CO vs $PM_{2.5}$ los valores fueron aún más bajos (Figura 51), indicando que tampoco es posible asociar estas dos especies; y en el caso de la estación Universidad no se contó con datos disponibles.

Figura 51 Estadística básica de $PM_{2.5}$ en los sitios fijos de muestreo para la campaña de monitoreo del 4 al 9 de junio de 2018



De manera similar se realizaron cocientes exclusivamente para gases contaminantes como una aproximación general del grado de envejecimiento fotoquímico de la atmósfera para identificar emisiones frescas debidas a cualquier proceso de combustión, cuya interpretación se basa en que las correlaciones más grandes entre CO vs NO, pueden deberse a emisiones frescas que tienen poco tiempo de permanencia en la atmósfera por lo que no han sido oxidadas de NO a NO_2, mientras que las correlaciones altas entre CO vs NO_2 se refieren a parcelas de aire envejecidas que fueron foto-oxidadas de NO a NO_2 debido la presencia de O_3 y COV's. (Parrish et al. 2002 y Chin et al. 1994). (Figura 52)

Figura 52 Estadística básica de $PM_{2.5}$ en los sitios fijos de muestreo para la campaña de monitoreo del 4 al 9 de junio de 2018



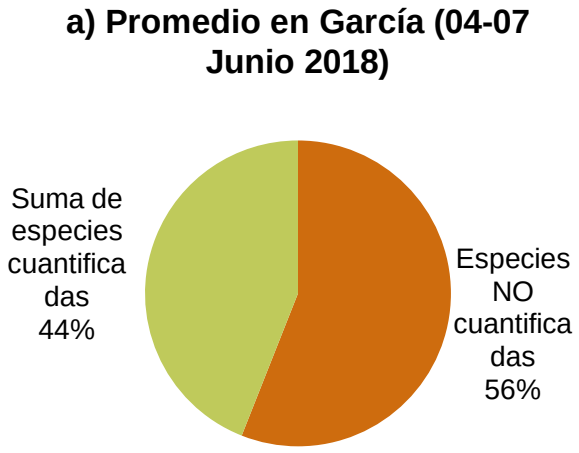
Se observa en la Figura 52 que el sitio García presenta una correlación más alta entre CO vs NO comparada con su correspondiente correlación de CO vs NO_2, indicando que en este lugar la atmósfera local tiene una fuerte influencia por emisiones frescas debido a la actividad industrial que ahí se presenta, destacando el giro de las pedreras. En el caso de la estación Universidad el cociente que presentó una mayor correlación fue CO vs NO_2, indicando que la especie que mayormente predomina es el NO_2, debido a la presencia de fuentes móviles que emiten NO y COV's favoreciendo la foto-oxidación y generando parcelas de aire químicamente envejecidas. Este fenómeno se repite en Cadereyta, la cual presenta

correlaciones más altas para el cociente CO-NO_2, aunque los procesos atmosféricos se pueden deber en este caso mayormente a envejecimiento u oxidación debido a un periodo más largo de permanencia en la atmosfera, más que a foto-oxidación debido a la presencia de COV's y O_3.

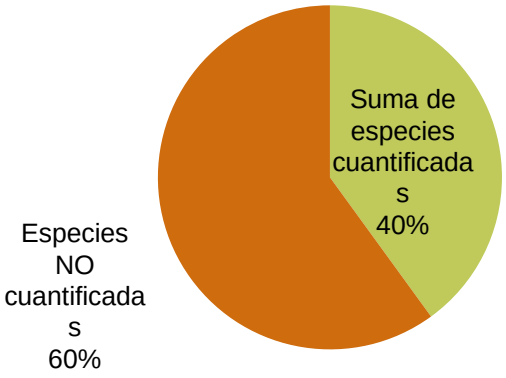
8.7 Composición química de $PM_{2.5}$ en aire ambiente para sitio García, Universidad y San Juan

Para la caracterización química de las muestras de $PM_{2.5}$ colectadas durante la campaña, se realizaron diferentes análisis por cromatografía iónica (CI), así como por Fluorescencia de Rayos X (XRF), lo que permitió identificar y cuantificar un porcentaje de la masa de $PM_{2.5}$ colectada en los filtros, mismas que se presentan en la Figura 53 como promedio de toda la campaña. Se observa que en general los porcentajes promedio de especiación química oscilaron entre el 31 al 44 %, siendo García el sito con el porcentaje más altos de especiación química (44%) y San Juan el sitio con el porcentaje más pequeño de identificación de especies, aun y cuando Universidad solo se lograron colectar dos muestras de 24 horas, mientras que en los otros dos sitios se monitorearon 4 días continuos.

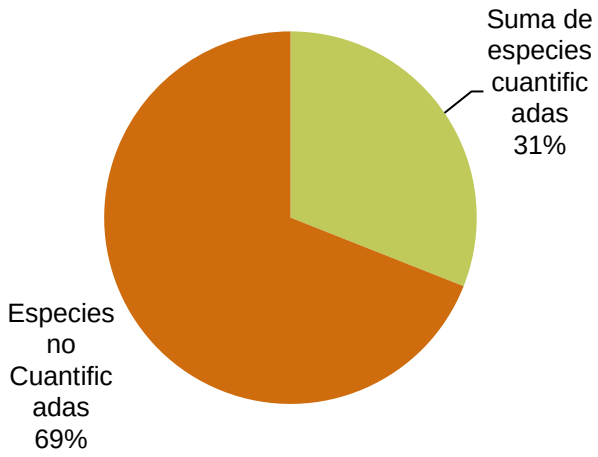
Figura 53 Porcentaje de cuantificación de especies químicas en las muestras de $PM_{2.5}$ colectadas durante la campaña de muestreo en el AMM.



b) Promedio en Universidad (06-07 Junio 2018)



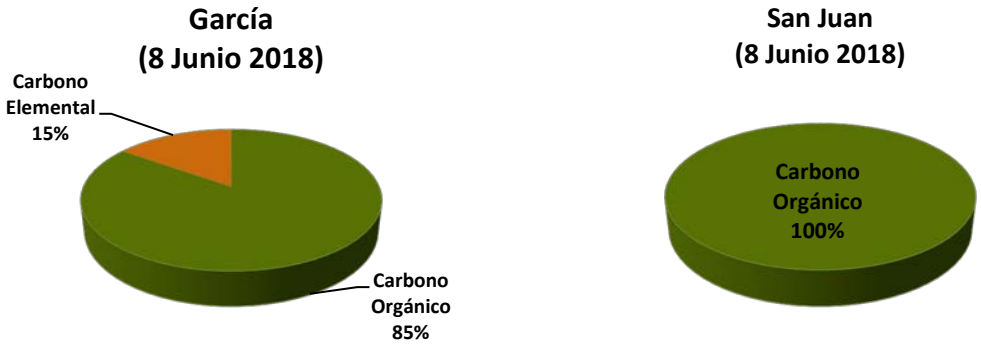
c) Promedio en San Juan (04-07 Junio 2018)



8.8 Especies de carbono

Con la finalidad de obtener una estimación general, se colectaron muestras simultáneas de carbón orgánico en filtros de cuarzo, para el día 08 de junio de 2018, tanto en García como en San Juan, resultando que la muestra correspondiente a García presentó un 15% de carbón elemental mientras que el resto correspondió a carbono orgánico (85%). Por su parte, en San Juan la muestra presentó 100% de carbón orgánico. (Figura 54)

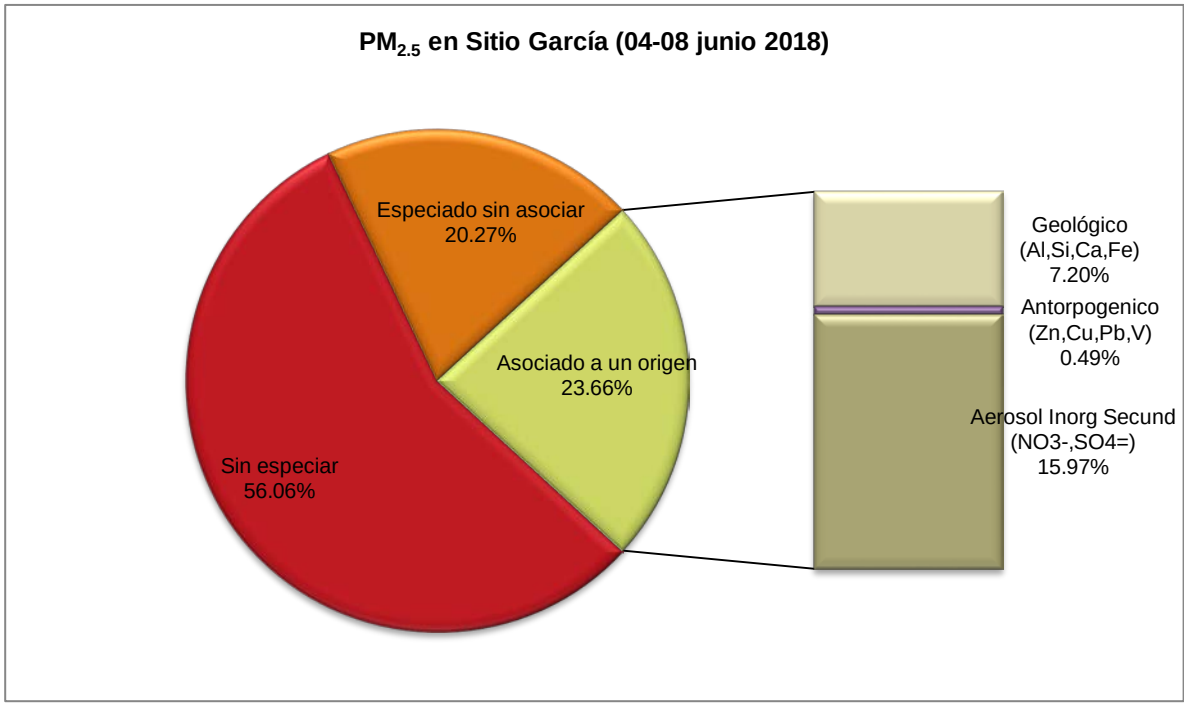
Figura 54 Porcentaje de cuantificación de carbono orgánico en las muestras de $PM_{2.5}$ colectadas durante la campaña de muestreo en el AMM.

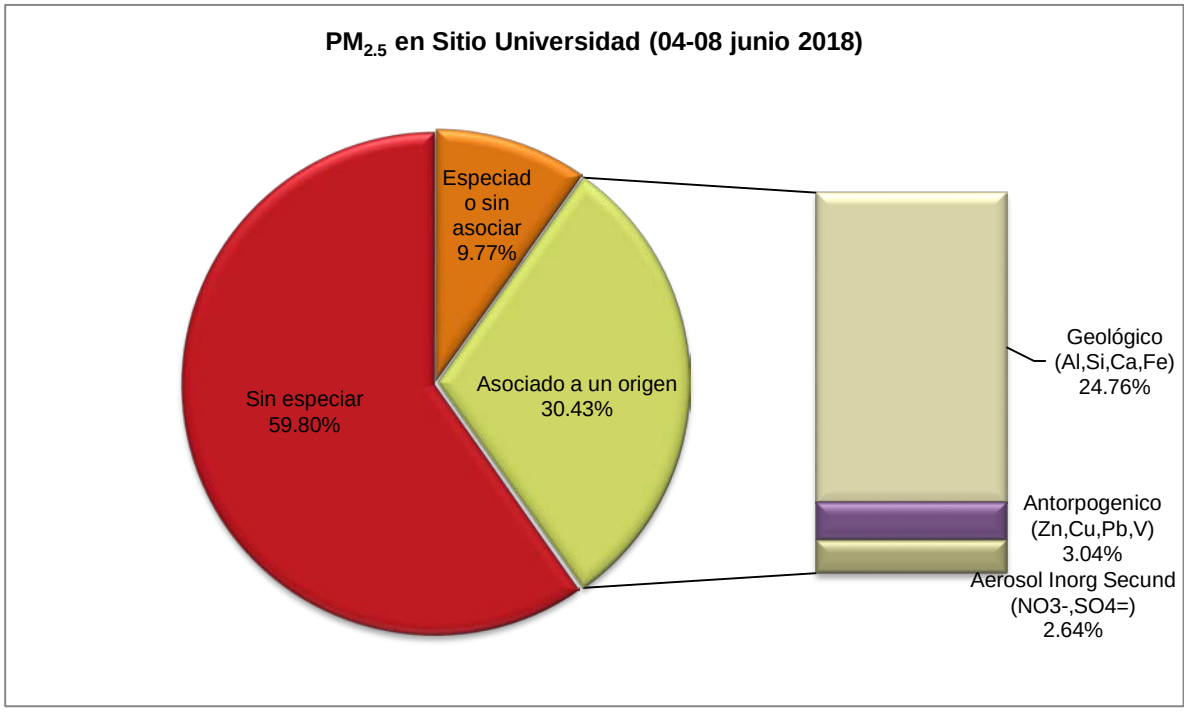


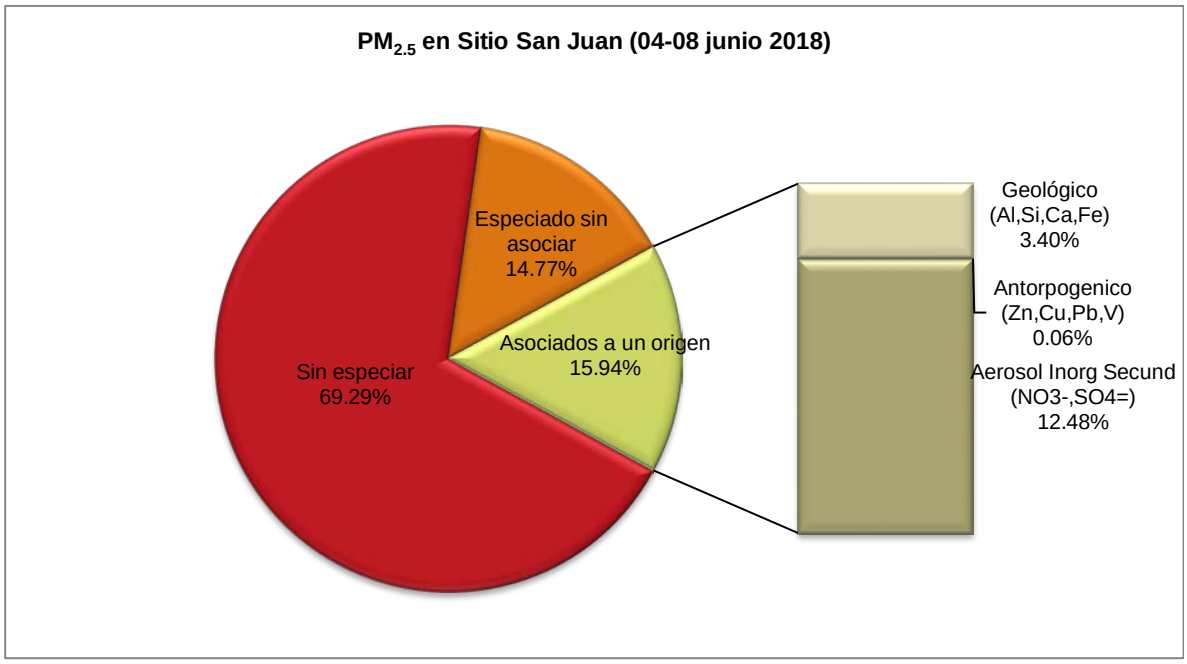
8.9 Estimación de aerosoles inorgánicos secundario (AIS)

En el caso de la cuantificación de carbono inorgánico promedio determinado en muestras de $PM_{2.5}$ en los tres sitios, se obtuvo a partir de la concentración de ciertos elementos o iones asociados a un origen en particular; de esta manera se clasificaron como elementos de origen geológico al aluminio (Al), silicio (Si), calcio (Ca) y fierro (Fe); de origen antropogénico al zinc (Zn), cobre (Cu), plomo (Pb) y vanadio (V); y como precursores de Aerosoles Inorgánicos Secundarios (AIS) a los iones nitrato (NO_3^-) y sulfato ($SO_4^=$) (Brook et al., 2003). De manera que como se observa en la Figura 55, el mayor porcentaje asociado a aerosoles inorgánicos secundarios se presentó en García con una contribución del 16% sobre la fracción de especies asociadas a un origen, mientras que en el caso de San Juan la fracción de AIS fue de 12.5% sobre la fracción asociada a un origen y en el caso de Universidad solo se encontró un porcentaje de 2.6% de precursores de AIS. Lo anterior demuestra que en el caso de García, la atmósfera presenta las mayores concentraciones sulfatos y nitratos registrados dentro del AMM debido a giros industriales como son pedreras, elaboración de productos inorgánicos (carbono y bicarbonato de sodio, cloruro de calcio, etc.) y otras actividades similares; mientras que en San Juan, los porcentajes altos de los iones sulfato y nitrato, se pueden deber a la actividad de la refinería aún y cuando éste sitio permanece mayormente viento arriba de las emisiones de esta fuente. Es importante señalar que los porcentajes de especiación bajos y sus correspondientes asociaciones a una fuente (≤ 40%), se deben en buena parte a la baja cantidad de muestras integradas de 24 horas, obtenidas para 1 semana de monitoreo. Por lo que se recomienda extender la duración de las campañas en campo para contar con un mayor número de muestras representativas.

Figura 55 Estimación de especies asociadas a fuentes de origen geológico, antropogénico y aerosoles inorgánicos secundarios a partir de muestras de $PM_{2.5}$ colectadas en el AMM







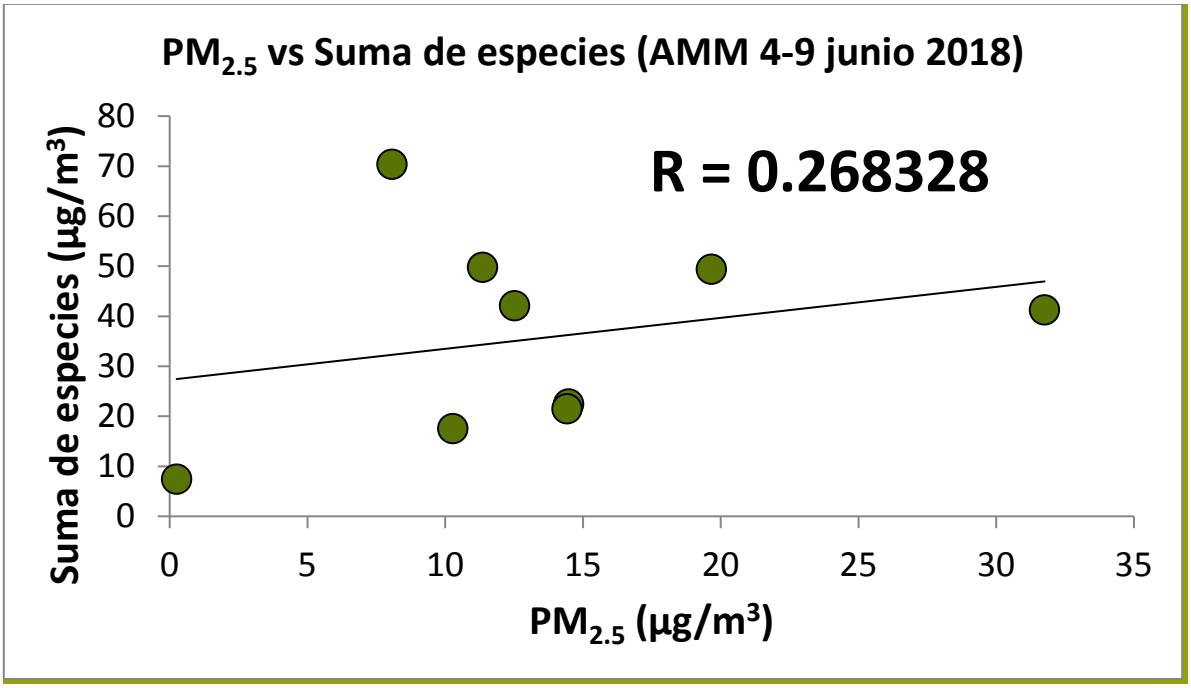
Por su parte el sitio Universidad registró el mayor porcentaje de material de origen geológico con un 24% de contribución asociado a un origen, lo que puede ser indicativo de la presencia de partículas resuspendidas por la actividad vehicular aun y cuando éstas se refieren a fracción $PM_{2.5}$ que de manera general se han asociado con emisiones frescas cuando no se conoce su composición química.

Por otro lado, el 70 % de los las especies desconocidas, son producto del bajo número de muestras (4 colectadas en una semana de muestreo). Como trabajo futuro, se recomienda realizar una campaña de monitoreo donde se utilicé como mínimo 100 muestras de filtros, cantidad mínima necesaria para obtener análisis representativos.

8.10 Suma de especies química vs masa

En la validación por suma de especies químicas, se relacionó la masa total obtenida en los filtros con la suma de las concentraciones determinadas por análisis químico de iones, carbono y elementos traza (Figura 56). En esta prueba la suma de las concentraciones químicas individuales de $PM_{2.5}$ debe ser menor o igual a la masa medida gravimétricamente.

Figura 56 Comparación entre masa y suma de especies (µg/m³) de $PM_{2.5}$ en las estaciones García, Universidad y San Juan.

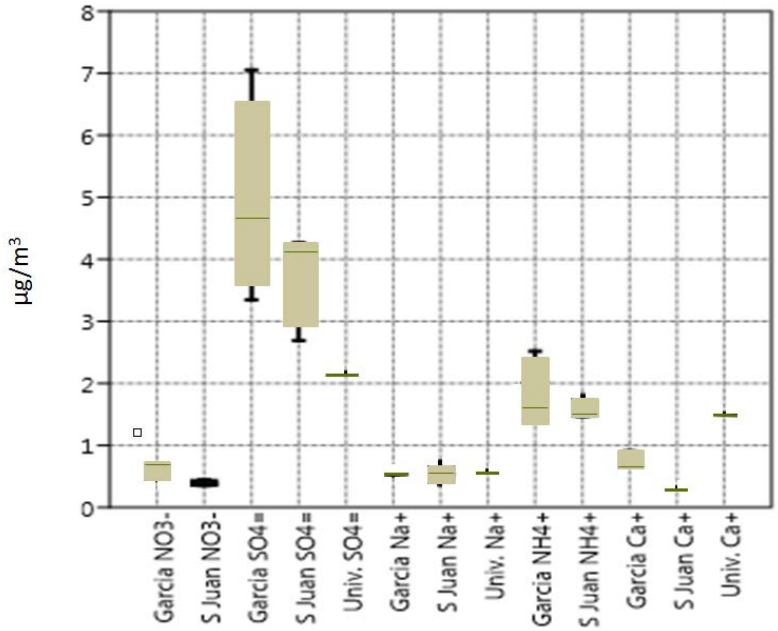


En todos los sitios de medición de la campaña la masa total de $PM_{2.5}$ fue mayor a la suma de especies químicas. Es importante mencionar que a pesar de que el coeficiente de correlación presentó valores bajos, en todos los casos la suma de especies se mantuvo por debajo de la concentración total de $PM_{2.5}$; lo que implica que no se determinaron todos los componentes contenidos en esta fracción de material particulado, o bien, que hubo evaporación significativa de algunas especies volátiles.

8.11 Balance iónico

En esta prueba se cuantificó el grado de neutralización entre cationes y aniones determinados en cada sitio de muestreo. En la Figura 57 se muestra la estadística básica y la dispersión de los datos para los cationes y los aniones.

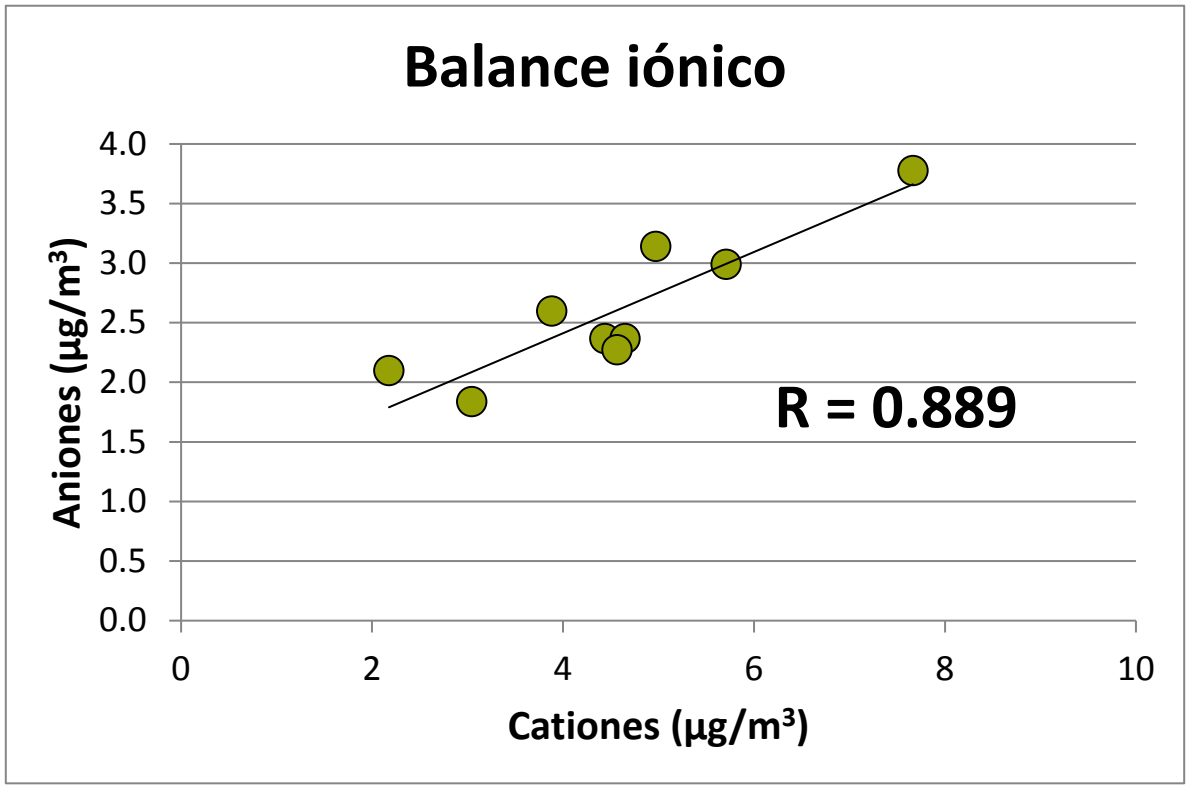
Figura 57 Estadística básica de cationes y aniones en $PM_{2.5}$ durante la campaña AMM.



En general las concentraciones más grandes y con mayor variabilidad de iones se presentaron para sulfatos tanto en García (4.5 µg/m³) como en San Juan (4.1 µg/m³), así como para el catión amonio en los sitios antes mencionados (García 1.8 µg/m³ y San Juan 1.6 µg/m³) presentando este último ion menos variabilidad en sus concentraciones máximas y mínimas con respecto al ion sulfato. Estos niveles de iones sulfatos son los responsables de tener un potencial de formación de aerosoles inorgánicos secundarios más que el nitrato para San Juan y García.

En la Figura 58 se muestra la correlación de cationes y aniones en $PM_{2.5}$ en las tres estaciones de la campaña AMM. Se observa que hubo una correlación significativa de 0.889, lo que indica que las $PM_{2.5}$ están neutralizadas en el balance entre cationes y aniones. Y considerando que el anión que se encontró mayormente presente en las muestras fue el sulfato ($SO_4^{=}$) por una parte, y en el caso del catión con mayor presencia fue el amonio (NH_3^{+}) nos permite entender que uno de los componentes presentes en las muestras de $PM_{2.5}$ fue el sulfato de amonio [$(NH_4)_2SO_4$].

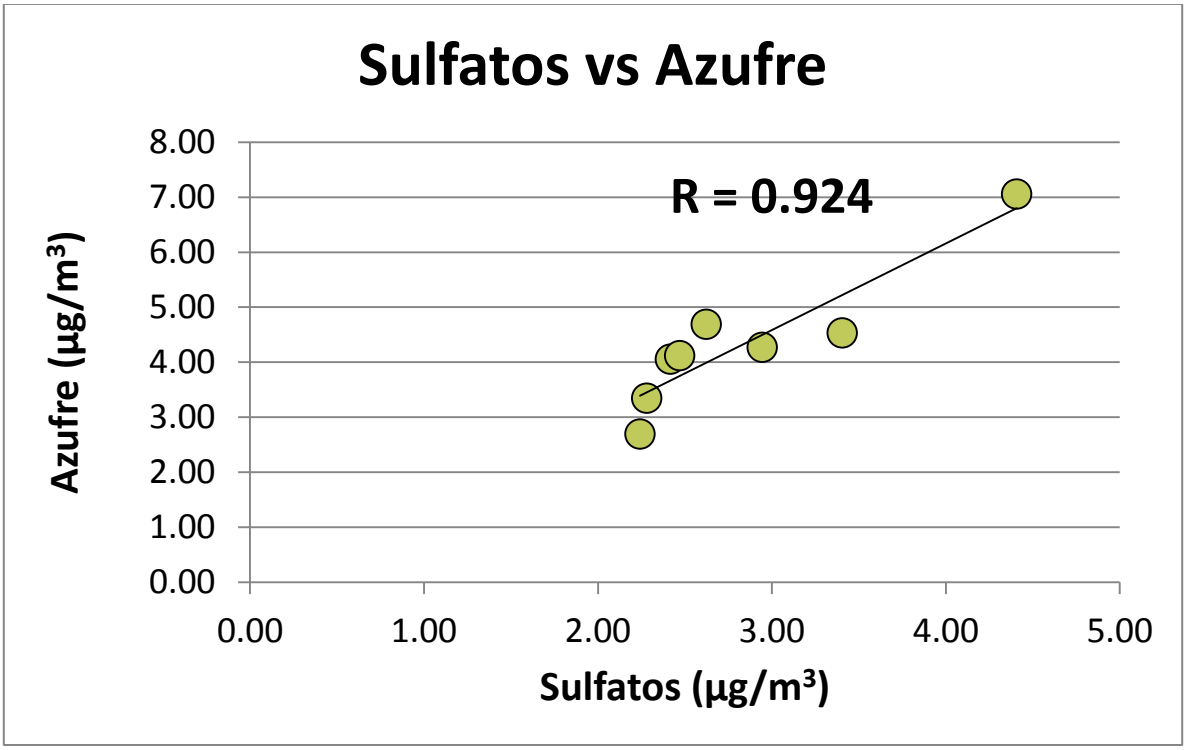
Figura 58 Correlación entre aniones y cationes en $PM_{2.5}$ en las estaciones García, Universidad y San Juan.



8.12 Correlación de especies solubles y totales

La correlación entre especies solubles y totales se realiza de manera general, para determinar el grado de disponibilidad de los iones y/o la manera en que se encuentra el elemento, por lo que se realizó esta correlación para el elemento–ión que estuvo presente en mayor concentración durante la campaña en dos de los tres sitios estudiados.

Figura 59 Correlación entre especies soluble (SO_4=) y elemento (azufre) para determinar el grado de disociación.



En la Figura 59 se muestra que el coeficiente de correlación entre el azufre y los sulfatos fue muy alto (R=0.92), lo que indica que esta especie también está disponible en forma de iones; y que puede provenir de una misma fuente, es decir puede estar presente en forma de sulfato de calcio en su forma natural (roca), o también como sulfato de amonio, pero que puede contribuir de manera importante en la formación de AIS.

De manera similar se calcularon coeficientes de correlación entre los iones amonio, calcio y sulfato para identificar la forma química de las especies que puede ser más abundante en los sitios monitoreados, encontrando que hay una correlación muy alta para García (R= 0.927) entre el sulfato y el amonio, con altas probabilidades que existan grandes cantidades de la sal de sulfato de amonio en esa zona, la cual tiene como uso principal el de fertilizante.

Tabla 10 Correlación entre iones y cationes en García y San Juan

SITIO	Coeficiente de correlación Sulfato vs Amonio	Coeficiente de correlación Nitrato vs Amonio
García	0.9287	0.0648
San Juan	0.6544	0.0200

9. Análisis de datos históricos de calidad del aire en el AMM

9.1 Revisión de la información de monitoreo de la calidad del aire

En esta sección se presenta la revisión de la información de la calidad del aire en el AMM, como parte de la descripción de su estado. Esta revisión incluye: a) Descripción de la red de monitoreo: identificación de las estaciones disponibles, cobertura y parámetros medidos; así como de los mecanismos de comunicación de la información de la calidad del aire; b) Los avances del análisis de la información de calidad del aire en: i) evaluación del cumplimiento de los estándares de calidad del aire e identificación de zonas y contaminantes prioritarios; ii) identificación de las tendencias de contaminantes a partir del análisis de las concentraciones mensuales, semanales y diarias; y iii) análisis de concentración de contaminantes mediante gráficos polares en función de la velocidad y dirección del viento.

Dentro de los principales hallazgos se encontraron:

- La red de monitoreo cuenta con una buena cobertura espacial, con 13 estaciones de monitoreo para la ZMM.
- Se cuentan con buenas alternativas para el reporte de información a través de internet y redes sociales. Sin embargo, la disponibilidad de información para alcanzar a personas sin acceso a internet es baja. La información de la red de monitoreo no se publica en tiempo real.
- El análisis de calidad de los datos mostró que la tasa de captura de información en la mayor parte de las estaciones es inferior al 75%, significando que no cumplen con los criterios de compleción de datos para realizar un análisis estadístico representativo.
- Los datos de la red de monitoreo hacen evidente que la problemática de la calidad del aire en la ZMM se asocia principalmente con PM_{10} y $PM_{2.5}$ así como con incumplimiento a los límites para ozono.
- El análisis de gráficas polares sugiere la potencial influencia de la actividad minera, vialidades y construcción en las excedencias de PM_{10} y de las fuentes de emisión ubicadas al Sur Este de la ZMM (refinería y planta de generación eléctrica) en las concentraciones de $PM_{2.5}$, así mismo, excedencias de ozono asociadas al tráfico vehicular.

9.2 Descripción de la Red de Monitoreo

La red de monitoreo atmosférico para la ZMM inició operaciones en 1970 con una red manual de 12 equipos de alto volumen para PST. Esta primera red estuvo operando hasta 1992, año en que el Gobierno del Estado adquiere los componentes de una red automática de monitoreo atmosférico para cinco estaciones (Obispado, San Bernabé, San Nicolás, Santa Catarina y La Pastora) configuradas para la medición de bióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, ozono, partículas suspendidas finas y meteorología, la cual fue operada por la Dirección de Planeación de la Subsecretaría de Ecología.

Los equipos de monitoreo instalados en 1992 fueron renovados en junio de 2003. En 2009, el SIMA amplió la cobertura de la red de medición de la calidad del aire con dos nuevas estaciones en los municipios de Escobedo y García. En junio de 2011 se agregó una nueva estación de monitoreo en el municipio de Apodaca. En agosto de 2012 se amplió nuevamente el sistema de monitoreo con una estación en el municipio de Juárez. Por otro lado, en 2014 inició operaciones en el municipio de San Pedro Garza García una estación adicional[8]. En el segundo semestre de 2017 se incorporaron tres estaciones al sistema: Cadereyta, Pueblo Serena y Universidad ubicadas en los municipios de Cadereyta Jiménez, Monterrey y San Nicolás de los Garza respectivamente[9]. A finales de agosto de 2018, se finalizó la instalación de equipos automáticos para la medición de $PM_{2.5}$ en nueve estaciones y se reubicó la estación García[10]; con estas incorporaciones el SIMA homologó su capacidad de medición y registro de contaminantes en todas sus estaciones.

9.3 Estaciones disponibles y cobertura

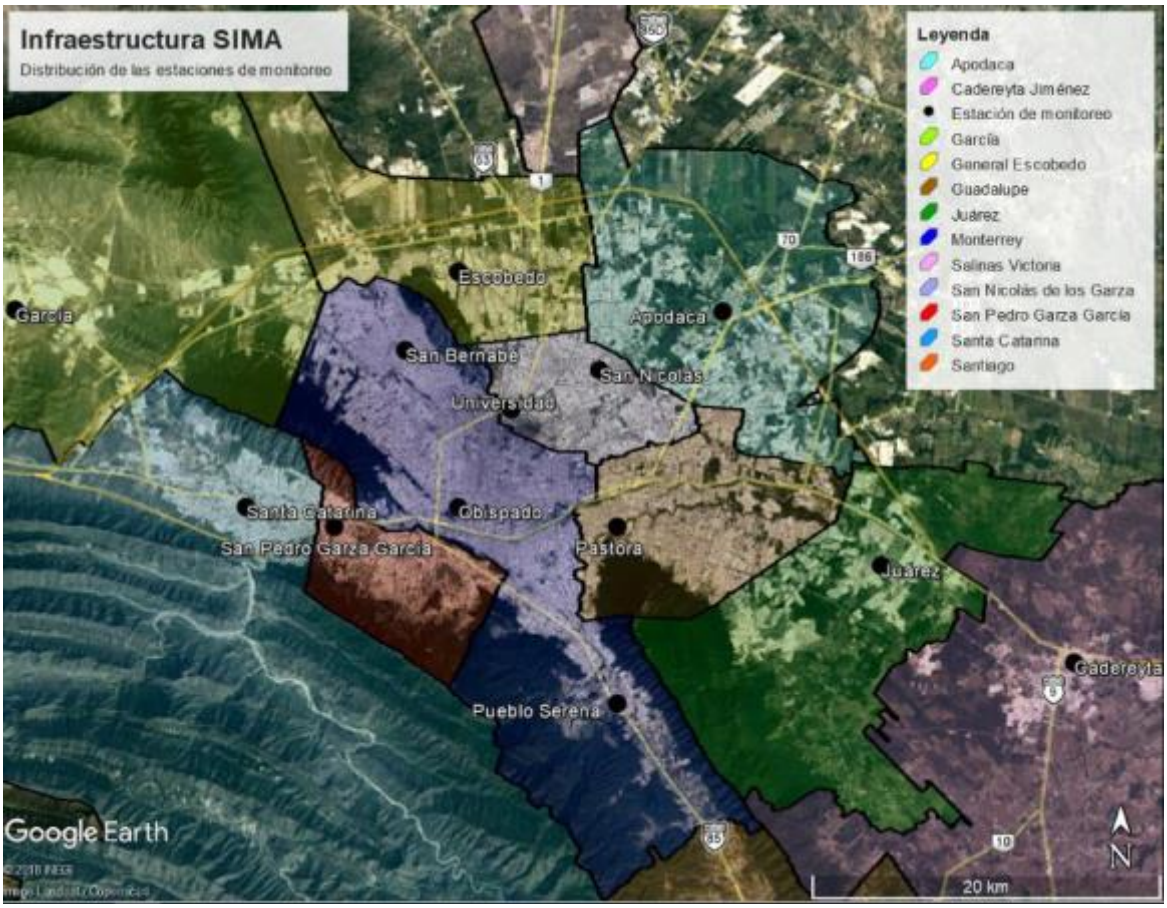
Las estaciones del SIMA están ubicadas en diez de los doce municipios que conforman la ZMM. La Tabla 11 presenta los nombres de las estaciones, los identificadores de cada una de ellas y el municipio en que se encuentra instalada la estación. La ubicación de las estaciones se incluye en el Mapa 7

[8] SEDASU. Programa de gestión para mejorar la calidad del aire del estado de Nuevo León ProAire 2016 - 2025. Monterrey: Secretaría de Desarrollo Sustentable de Nuevo León, 2016.
[9] Inaugura NL dos nuevas estaciones de monitoreo ambiental. Boletín. [En línea] 4 de Octubre de 2017. [Citado el: 6 de Septiembre de 2018.] http://www.nl.gob.mx/noticias/inaugura-nl-dos-nuevas-estaciones-de-monitoreo-ambiental.
[10] Inicia Estado operación de nuevos mecanismos de monitoreo ambiental. Boletín. [En línea] 31 de Agosto de 2018. [Citado el: 6 de Septiembre de 2018.] http://www.nl.gob.mx/noticias/inicia-estado-operacion-de-nuevos-mecanismos-de-monitoreo-ambiental.

Tabla 11 Nombres e identificadores de las estaciones automáticas de monitoreo de calidad del aire ubicadas en el AMM

Nombre de la estación de monitoreo		Identificador de la estación de monitoreo	Municipio
Apodaca	Noreste 2	NE2	Apodaca
Cadereyta	Sureste 3	SE3	Cadereyta Jiménez
Escobedo	Norte	N	General Escobedo
García	Noroeste 2	NO2	García
Juárez	Sureste 2	SE2	Juárez
Obispado	Centro	CE	Monterrey
Pastora	Sureste	SE	Guadalupe
Pueblo Serena	Sur	S	Monterrey
San Bernabé	Noroeste	NO	Monterrey
San Nicolás	Noreste	NE	San Nicolás de los Garza
San Pedro Garza García	Suroeste 2	SO2	San Pedro Garza García
Santa Catarina	Suroeste	SO	Santa Catarina
Universidad	Norte 2	N2	San Nicolás de los Garza

Mapa 7 Distribución del sistema de monitoreo atmosférico en la ZMM. Fuente: Elaboración propia con información de SIMA, 2018 (4) y SINAICA, 2018 (5)



9.4 Estaciones y parámetros medidos

Todas las estaciones de monitoreo atmosférico registran las concentraciones de seis contaminantes criterio: bióxido de azufre, bióxido de nitrógeno y ozono (en ppb), monóxido de carbono (en ppm), PM_{10} y $PM_{2.5}$ (en $\mu g/m^3$). Por otro lado, todas las estaciones registran también, los parámetros meteorológicos de dirección y velocidad de vientos, humedad relativa, precipitación pluvial, presión atmosférica, radiación solar y temperatura[11] [12].

[11] SIMA. Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA) Nuevo León. Reporte de la calidad del aire en el área metropolitana de Monterrey. [En línea] Secretaría de Desarrollo Sustentable de Nuevo Léon, 2018. [Citado el: 6 de Septiembre de 2018.] http://aire.nl.gob.mx/map_calidad.html.

[12] SINAICA. Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire. Red de monitoreo: Monterrey (MTY). [En línea] 2018. [Citado el: 6 de Septiembre de 2018.] http://sinaica.inecc.gob.mx/.

9.5 Análisis de Información de la Calidad del Aire

Los datos validados reportados por la red de monitoreo de las 10 estaciones de monitoreo que conforman la Área Metropolitana de Monterrey, fueron analizados para los años 2014 -2016. La información de 2017 no fue incluida debido a que los datos validados aún no se encontraban disponibles en el momento de hacer los análisis. A partir de la información disponible, este análisis incluyó la: i) evaluación del cumplimiento de los estándares de calidad del aire e identificación de zonas y contaminantes de interés prioritarios; ii) identificación de las tendencias de contaminantes a partir del análisis de las concentraciones mensuales, semanales y diarias; y iii) análisis de concentración de contaminantes mediante gráficos polares en función de la velocidad y dirección del viento.

A continuación, se presenta la metodología utilizada para este análisis, los avances y conclusiones preliminares.

9.6 Metodología

Con el propósito de determinar las posibles fuentes que contribuyen a la contaminación de aire en la Zona Metropolitana de Monterrey a partir de información histórica, se llevó a cabo un análisis de las concentraciones anuales, mensuales, diarias y horarias de PM_{10}, $PM_{2.5}$, NO_2, SO_2 para los años 2014 - 2016, utilizando los datos reportados por la red de monitoreo SIMA. Para el análisis se utilizó el programa Openair[13] en conjunto con Excel, para hacer un análisis compilado de los datos históricos de la red, así como para la realizaron gráficos polares y tendencias.[14] En particular se realizaron los siguientes análisis.

Análisis compilado de los datos de monitoreo. Los datos fueron graficados primero en formato de resumen usando la función "SummaryPlot", la cual fue creada específicamente para sintetizar y analizar aspectos importantes de los datos derivados del monitoreo. Los diagramas generados por esta herramienta presentan la captura de datos, la variación de los valores en el tiempo, un resumen estadístico general y los histogramas con la distribución para cada especie. Estos diagramas permiten al usuario identificar rápidamente brechas de datos significativas y potenciales problemas con la calidad de los datos.[15]

[13] La herramienta, documentación y otras fuentes de información se encuentran disponibles a través de sitio web: http://www.openair-project.org/

[14] Esta herramienta de Software novedosa para el análisis de datos está diseñada para evaluar datos de calidad del aire, complejos análisis de contaminantes e interacciones con la meteorología.

[15] Este proceso se utilizó para identificar y eliminar del análisis los datos que no se consideraron correctos (por ejemplo, períodos de datos inusuales en comparación con la tendencia general) y para marcar

A partir de este análisis se identifican posibles fuentes de contaminación a través del siguiente proceso:

a) Análisis de la tendencia temporal de las concentraciones mensuales, semanales y diarias, utilizando la función “TimeVariation”. La variación de los contaminantes por hora del día y día de la semana, puede revelar información útil sobre las posibles fuentes. Por ejemplo, las emisiones vehiculares tienden a seguir patrones regulares durante el día y la semana. En contraste, algunas emisiones industriales o contaminantes de fuentes de origen natural (por ejemplo, aerosol de sal marina), a menudo muestran patrones muy diferentes. La función “TimeVariation” genera cuatro diagramas: i) variación por día de la semana, ii) variación promedio horario, iii) una combinación de la variación horaria y por día de la semana y iv) un diagrama mensual. En los diagramas se indica el intervalo de confianza del 95% en la media.
b) Identificación de las concentraciones promedio de los contaminantes en función de la velocidad y dirección del viento, mediante el desarrollo de diagramas bipolares utilizando la función "PolarPlot". Estos factores se calculan dividiendo la velocidad del viento, dirección del viento y concentraciones en diferentes clases según velocidad-dirección. Así, se calcula el valor promedio de concentración. Los gráficos obtenidos son útiles porque permiten estimar las fuentes de emisión y su proximidad a la estación de monitoreo. Es importante mencionar que esta metodología no indica las distancias exactas.

9.7 Resultados y Análisis

Las estaciones de monitoreo ambiental se pueden clasificar con relación a la fuente de emisión predominantes, las cuales se presentan en la Tabla 12

Tabla 12 Tipo de estaciones en relación con las fuentes de emisión

Tipo	Característica
Urbano	
Industrial Habitacional Servicios Mixto* Vehicular	Ubicada dentro de los límites de un área urbana y sus alrededores presentan un uso predomínate de suelo
Rural	
Área Natural Protegida Ecosistema natural Ecosistema productivo inducido (agrícola, ganadero, forestal, turístico).	Ubicada en espacios no urbanizados cuyo uso del suelo puede variar desde productivo hasta conservación.

*Los usos mixtos deben tener un porcentaje mayor al 25% de usos industrial y/o servicios.

Fuente: Redes Estaciones y Equipos de Medición de la Calidad del Aire del INE.

contaminantes con captura de datos deficiente por debajo de un umbral de captura de datos anual del 75% (establecido en la normatividad mexicana).

De acuerdo con lo establecido en el Proaire 2016 – 2025, las estaciones de la red de monitoreo se clasifican con base al entorno de su ubicación siendo una red con una característica principalmente urbana.[16] A partir de lo anterior para propósitos del análisis, se estableció una posible clasificación del tipo de estación, utilizando los criterios del INECC y una herramienta de georreferenciación de los sitios de la Red (Ver Tabla 13). Esto permitió identificar falta de claridad en el tipo de estación. No se observan estaciones dedicadas a caracterizar de manera particular el tráfico vehicular. Asimismo, se recomienda revisar los criterios de clasificación en todos los sitios en torno a los objetivos de la red para garantizar la representatividad de la muestra y poder establecer con claridad la influencia de las fuentes sobre las concentraciones medidas.

Tabla 13 Área de influencia y clasificación de las estaciones

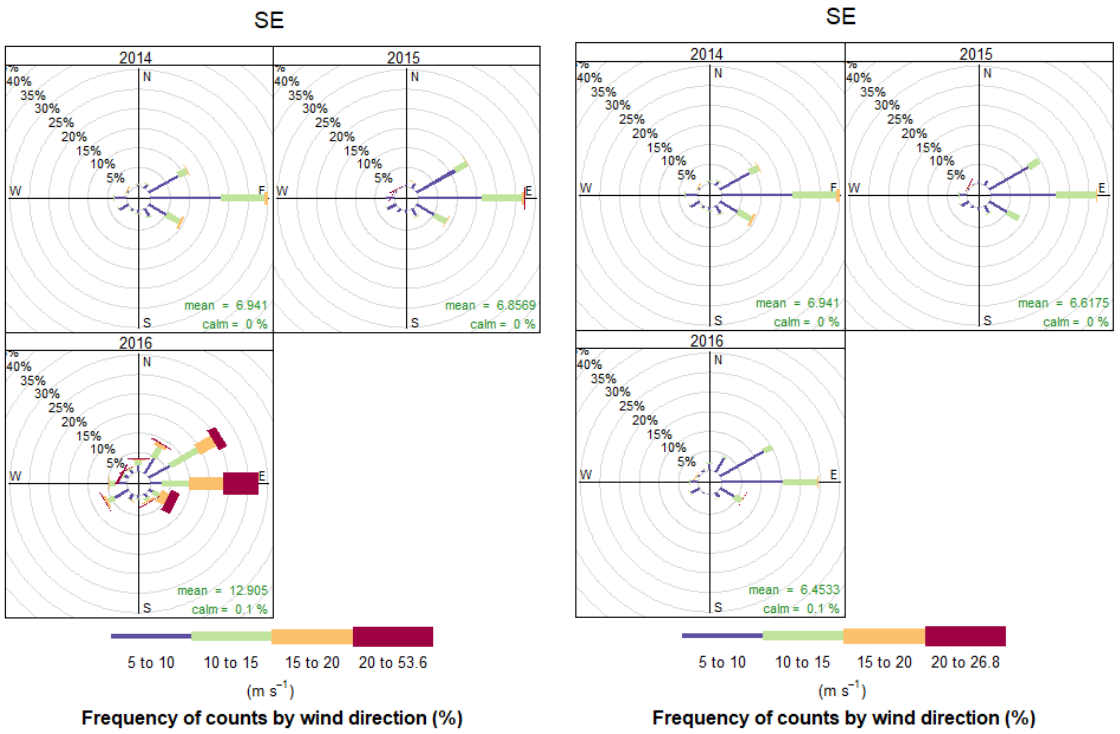
Estación	Código	Entorno de Ubicación	Clasificación
Obispado	CE	Mide impactos del tráfico y la mezcla de los contaminantes de la mayoría de las fuentes industriales.	Mixto
Escobedo	N	Localizada dentro de un área de concentración poblacional, monitorea la contaminación de fuentes fijas y móviles de la zona norte del AMM.	Mixto
San Nicolás	NE	Localizada en un área altamente poblada, permitiendo determinar los índices de contaminación atmosférica en la parte norte. Industrial.	Industrial
Apodaca	NE2	Localizada en el centro de la ciudad de Apodaca, principalmente una zona habitacional y comercial, rodeada por zona industrial.	Industrial
San Bernabé	NW	Localizada a favor del viento de salida, en un área de alta concentración de población, al oeste de las fuentes industriales y de tráfico.	Habitacional
García	NW2	Localizada a favor del viento de la mayoría de las fuentes industriales del municipio de García, en un área de alta concentración de población.	Industrial
La Pastora	SE	Localizada a favor del viento en un área altamente poblada.	Habitacional
Juárez	SE2	Localizada en el centro de Juárez, predomina zona habitacional.	Habitacional
Santa Catarina	SW	Localizada a favor del viento de la mayoría de las fuentes industriales de Monterrey, San Pedro Garza García y Santa Catarina.	Industrial
San Pedro	SW2	Localizada en área residencial, rodeada por áreas verdes y zonas desprovistas de vegetación.	Habitacional

El primer paso en la identificación de posibles fuentes de emisión consistió en la validación de los datos reportados por la red para 2014-2016. Los datos fueron revisados para identificar posibles brechas y la calidad de la información, asimismo

[16] Área urbana hace referencia a una ubicación en límites de un área urbana con predominante uso del suelo. Área rural representa a los lugares no urbanizados cuyo uso del suelo pueden variar desde tipo productivo a de conservación (INE).

se asume que los datos han sido validados y verificados previamente por la autoridad ambiental de acuerdo con su programa de gestión del aseguramiento y control de la calidad de la información (NOM – 156 – SEMARNAT 2012). El análisis permitió identificar posibles problemas con los datos de velocidad del viento en la estación La Pastora en el año 2016 (SE). En este año la velocidad del viento se duplicó con relación a los años anteriores. Este es un error comúnmente encontrado cuando la configuración del equipo no se hace correctamente. Para propósitos del análisis, la información fue corregida por un factor de 0.5 (Ver Figura 60).

Figura 60 Datos de velocidad del viento reportados por la Estación La Pastora (SE) en 2016



Adicionalmente, las estaciones de García (NW2) y Juárez (SE2) presentan vacíos importantes en los datos de velocidad y dirección de los vientos para los años de análisis. Después de una revisión de los patrones típicos del viento en las dos estaciones, se definió usar para propósitos del análisis los datos meteorológicos de La Pastora (SE) para NW2 y los de Santa Catarina (SW) para SE2.

Así mismo, el análisis de captura de la información mostró que la mayoría de los datos recolectados no cumplen el criterio de suficiencia de datos, tanto de parámetros meteorológicos como de contaminantes. Un mínimo de 75% de datos al año deben ser capturados para generar los indicadores anuales estadísticos de estado y tendencias de calidad del aire (Ver Tabla 14). En el año 2015 y 2016 y parte del año 2014, la tasa de captura de casi todas las estaciones fue inferior al

75%, excepto para el PM_{10}; lo cual no permite llevar a cabo un análisis robusto de los datos. Esto puede deberse en parte a los cambios, incorporación y/o retiro de analizadores a la red que se ha realizado durante los diferentes años. Esto representa un reto importante puesto que la medición es valiosa siempre que sea representativa y con alto grado de confiabilidad. Más allá deben existir criterios pre-establecidos de precisión, sesgo, representatividad y suficiencia, para obtener la información que conformará los reportes de la calidad del aire de la localidad.

Tabla 14 Resultados del análisis de captura de información anual

Nombre	Código	2014					2015					2016				
		NO_2	O_3	PM_{10}	PM_{25}	SO_2	NO_2	O_3	PM_{10}	PM_{25}	SO_2	NO_2	O_3	PM_{10}	PM_{25}	SO_2
Obispado	CE	90.6	92.3	95.3	71.9	0	94.7	96.6	94.6	50.6	6.2	86.8	19.3	98.9	0	40.1
Escobedo	N	65.1	98.6	95.8	-	63.8	54.2	69.9	76.7	-	87.6	28.2	24.3	98	-	40.9
San Nicolás	NE	74.2	99.1	98	81.2	37.3	81.1	87.6	93.9	64.6	83.2	0	77.7	98.2	4	73.5
Apodaca	NE2	58.8	10	87.4	34.4	85.7	46	14.8	89.9	77.6	41.9	18.9	0	93.5	70.6	94
San Bernabé	NW	91.1	99.9	95.7	58.5	98.3	68.3	84.7	95.2	86.7	96.2	74	96	98	36.5	84.5
García	NW2	-	98.8	91.8	-	-	-	95.9	83.3	-	-	-	87.1	84.1	-	-
La Pastora	SE	-	98	94.7	63.4	40.1	-	96.6	92.7	47.8	74.7	-	95.6	97.1	46.3	90
Juárez	SE2	56.4	7.6	73.1	-	60.9	89.1	50.3	95.9	-	24.5	96.6	37.9	99	-	51.7
Santa Catarina	SW	78.3	80.8	93.7	74.4	81.6	13.8	30.8	92.2	62.6	31.1	37.1	92.8	96.7	64.5	91.5
San Pedro	SW2	81.6	46.3	83.9	44.1	81.4	59	43.3	88.4	45	51.1	84.7	88.5	96.7	53.1	93.2

Convenciones: Gris, sin datos disponibles, rojo captura menor al 75% de los datos

A pesar de estas deficiencias tanto en la captura como en la validación de la información y verificación de la calidad de los datos, se llevó a cabo la evaluación del cumplimiento de estándares nacionales de calidad del aire.

La evaluación del cumplimiento de los límites establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas emitidas por la Secretaría de Salud para el año 2016 se resume en la Tabla 15**.** Para este propósito, se han retirado los contaminantes cuya captura anual es inferior al 40% (BC – Baja Captura). Como se puede observar, se presentan excedencias en todas las estaciones para los estándares de PM_{10}, $PM_{2.5}$ y O_3, cabe anotar que las estadísticas de $PM_{2.5}$ utilizadas tienen una captura inferior al 75%. Contaminantes como el SO_2 o NO_2 no presentan excedencia, lo cual es el caso similar para los años anteriores de análisis. No obstante, la red no incluye sitios que permitan caracterizar el tráfico vehicular y conocer el impacto de las fuentes

vehiculares sobre la calidad del aire, por lo que es posible que se estén pasando por alto las excedencias de estos contaminantes. Según la Agencia de Medio Ambiente de los Estados Unidos (USEPA), si hay propiedades residenciales a lo largo de carreteras de alto flujo de vehículos, se recomienda proporcionar al menos dos sitios de monitoreo en tal ubicación. En particular, vías con volúmenes altos de vehículos diésel.

Tabla 15 Cumplimiento de los límites normativos de Calidad del Aire para 2016

		PM_{10}		$PM_{2.5}$		O_3		SO_2		NO_2
Nombre	Código	Límite 24 h. (75 µg/m³)	Límite anual (40 µg/m³)	Límite 24 h. (45 µg/m³)	Límite anual (12 µg/m³)	Límite 1 h. (0.095 ppm)	Límite Promedio móvil de 8 h. (0.070 ppm Quinto máximo)	Promedio móvil de 8 h. (0.200 ppm Tercero máximo)	Promedio 24 h. (0.110 ppm Segundo Máximo)	Dato horario (0.210 ppm Segundo máximo)
Obispado	CE	**157.7**	**55.0**	BC	BC	BC	BC	LD	LD	0.058
Escobedo	N	**132.6**	**53.0**	-	-	BC	BC	LD	LD	LD
San Nicolás	NE	**158.7**	**61.9**	BC	BC	**0.108**	**0.072**	0.025	0.017	LD
Apodaca	NE2	**160.1**	**57.4**	**70.4**	**31.0**	BC	BC	0.034	0.016	LD
San Bernabé	NW	**230.9**	**68.5**	BC	BC	**0.116**	**0.079**	0.014	0.011	0.027
García	NW2	**217.0**	**78.6**	-	-	**0.144**	**0.086**	-		-
La Pastora	SE	**99.8**	**42.9**	**54.5**	**20.9**	**0.125**	**0.074**	0.021	0.016	-
Juárez	SE2	**167.3**	**61.9**	-	-	BC	BC	0.032	0.009	0.048
Santa Catarina	SW	**216.6**	**64.9**	**52.6**	**24.7**	**0.148**	**0.094**	0.013	0.008	LD
San Pedro	SW2	**250.9**	**62.4**	**51.3**	**20.0**	**0.106**	**0.064**	0.012	0.012	0.046

Información de captura de datos

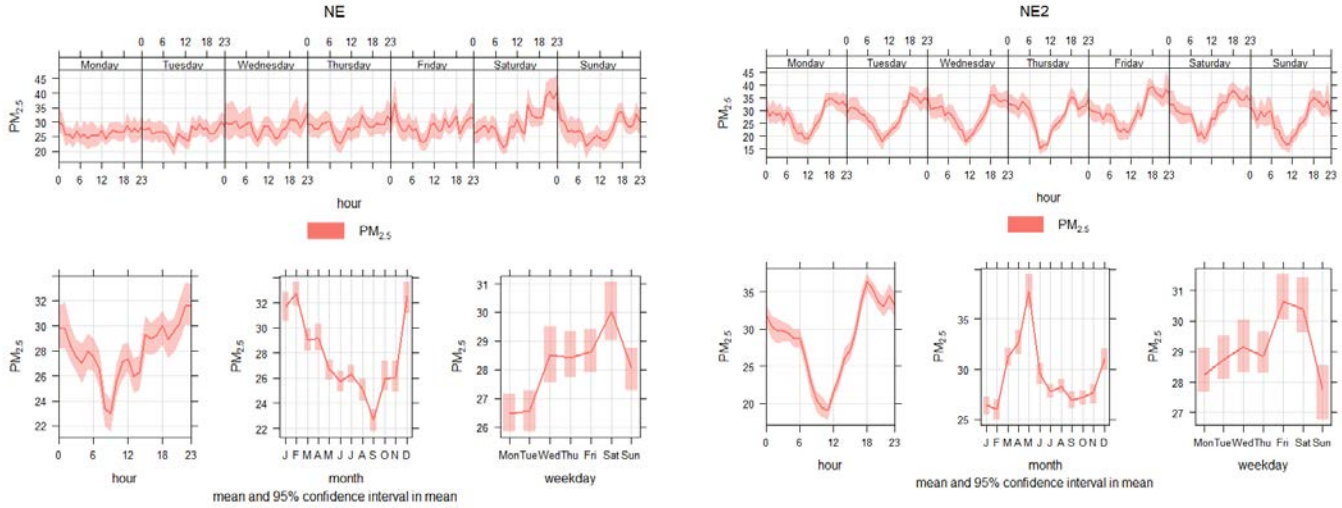
BC	<40% captura de datos – Baja Captura
	40-60%
	60-75%

9.7.1 Análisis de $PM_{2.5}$

Los diagramas de variación de tiempo que se prepararon para $PM_{2.5}$ permiten observar las tendencias temporales en términos de hora, día, semanal y mensual (Ver Figura 61). A continuación, se muestran las tendencias temporales de los 6 sitios analizados a partir de la información disponible. Los sitios presentan patrones temporales diferentes. En los sitios NE, NE2 y NW se presentan las concentraciones más altas durante la noche, lo cual es inusual. Esto puede deberse a un problema con el equipo de medición o a actividades no registradas.

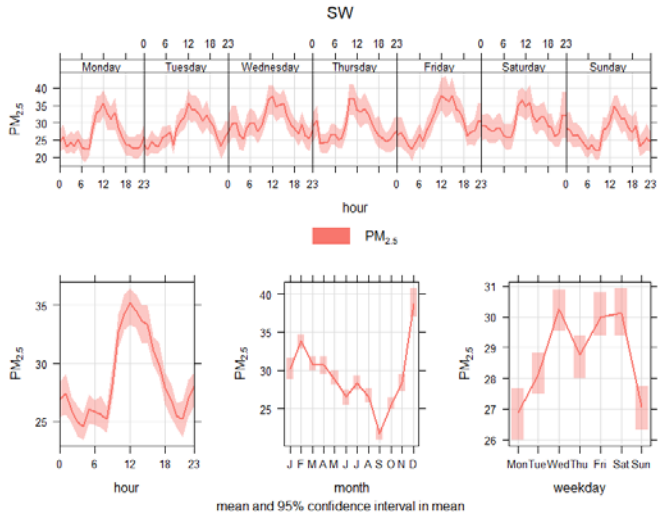
En el caso de $PM_{2.5}$ la información disponible permitió la preparación de gráficos polares para seis de los sitios, utilizando los datos de 2014 a 2016 (Ver Figura 62). Las concentraciones pueden asociarse con las emisiones provenientes de la refinería en Cadereyta, así como a la planta de generación eléctrica.

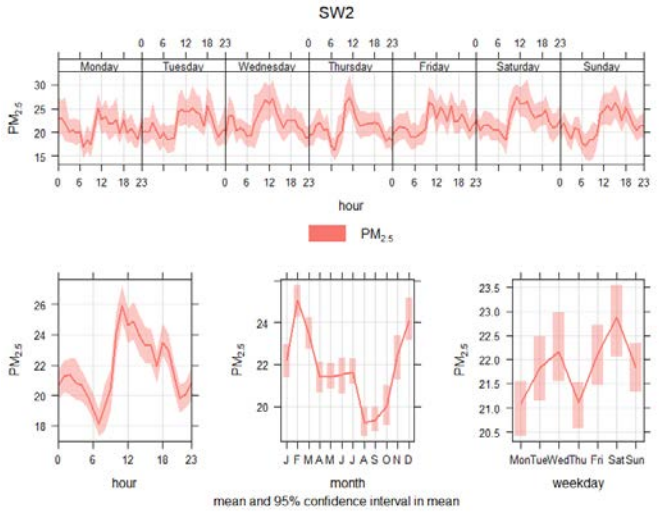
Figura 61 Datos de velocidad del viento reportados por la Estación La Pastora (SE) en 2016

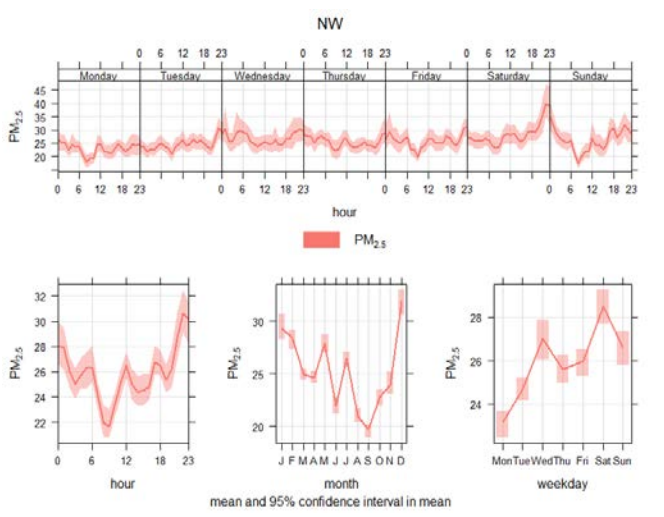


Código de Estaciones

Obispado	CE
Escobedo	N
San Nicolás	NE
Apodaca	NE2
San Bernabé	NW
García	NW2
La Pastora	SE
Juárez	SE2
Santa Catarina	SW
San Pedro	SW2


SW
Monday
Tuesday
Wednesday
Thursday
Friday
Saturday
Sunday
hour
PM2.5
month
weekday
mean and 95% confidence interval in mean


SW2
Monday
Tuesday
Wednesday
Thursday
Friday
Saturday
Sunday
hour
PM2.5
month
weekday
mean and 95% confidence interval in mean


NW
Monday
Tuesday
Wednesday
Thursday
Friday
Saturday
Sunday
hour
PM2.5
month
weekday
mean and 95% confidence interval in mean

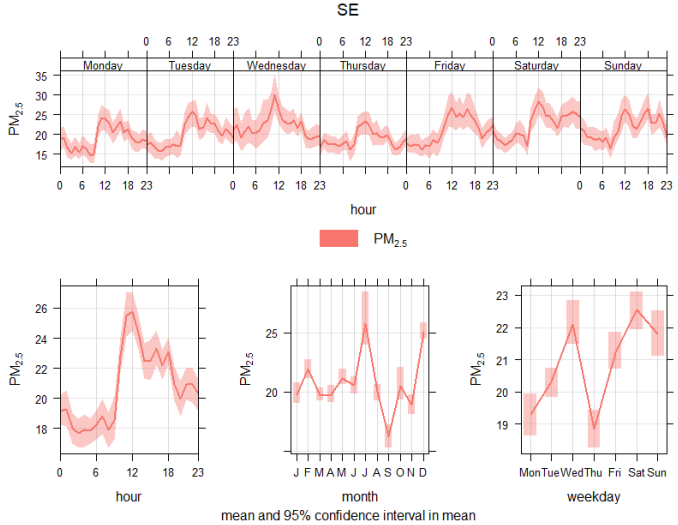
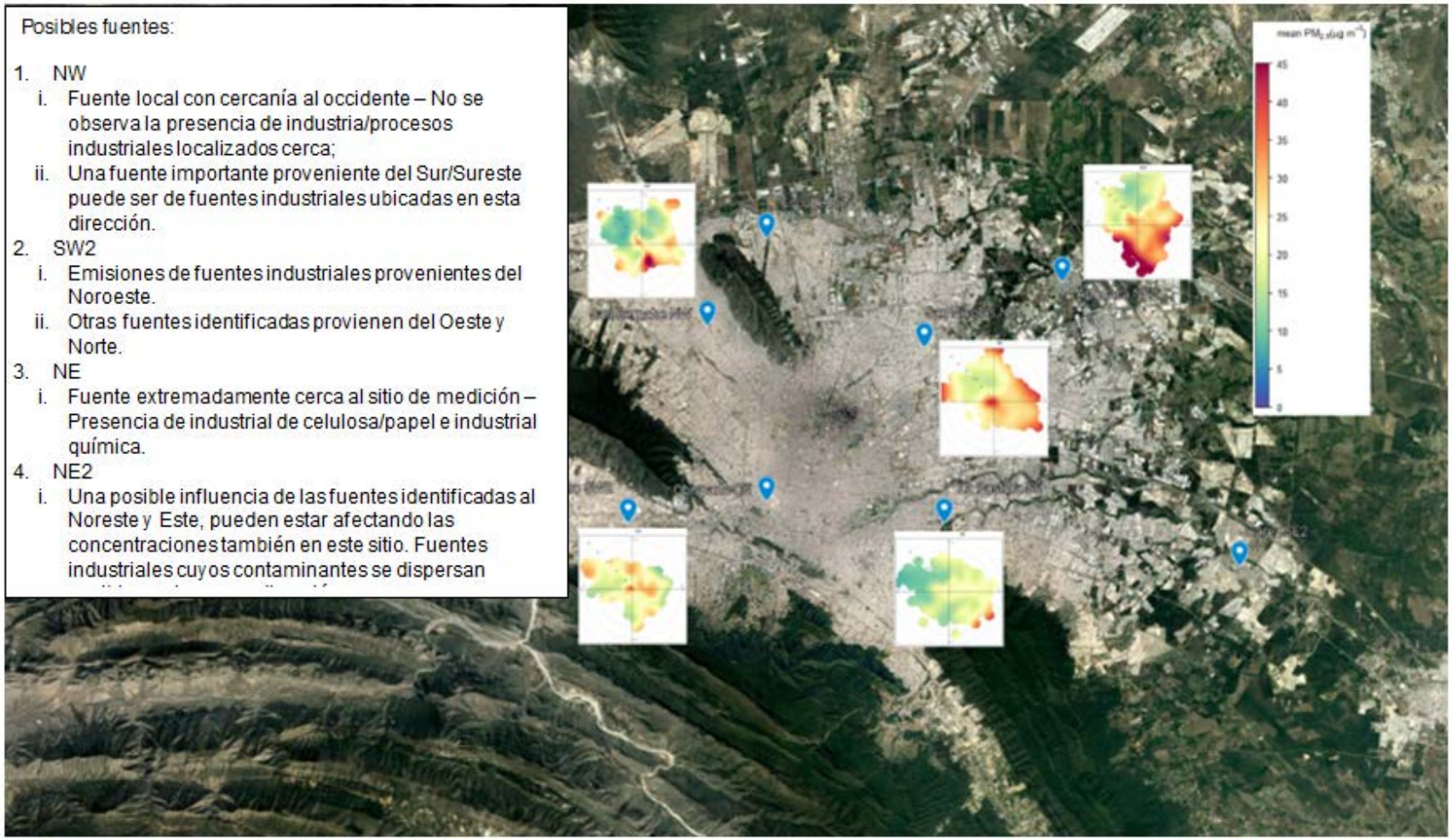

SE
Monday
Tuesday
Wednesday
Thursday
Friday
Saturday
Sunday
hour
PM2.5
month
weekday
mean and 95% confidence interval in mean

Figura 62 Gráfico polar anual por hora para $PM_{2.5}$, 2014 – 2016



10. Resultados con DOAS

A continuación, se presentan los resultados de las mediciones realizadas, así como los cálculos de emisión de dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre para los sitios antes mencionados. El número de mediciones refleja las mediciones en donde se pudo llevar a cabo el cálculo de emisión de dióxido de nitrógeno y/o dióxido de azufre, aunque, como se mencionó anteriormente, en todos los sitios se llevaron a cabo mediciones de espectros los cuales fueron posteriormente evaluados para estimar columnas de dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre. (Ver Tabla 16)

Tabla 16 Resultados obtenidos a partir de mediciones con DOAS-mobile en el AMM

Sitio	Número de mediciones	NO_2 (ton/día)		SO_2 (ton/día)	
		Emisión promedio	Desviación estándar	Emisión promedio	Desviación estándar
Cadereyta	19 NO_2, 18 SO_2	17.6	12.56	554.44	445.29
Industria	10 NO_2	7.75	1.79	n.d	n.d
Industria	10 NO_2	1.50	0.53	n.d	n.d
Industria	12 NO_2	1.03	0.98	n.d	n.d
Industria	10 NO_2	0.58	0.37	n.d	n.d
Monterrey	2 NO_2	687.41	331.76	n.d	n.d

n.d. = No determinado

En resumen, solamente en 6 sitios se pudo claramente identificar una pluma de NO_2 y solamente en uno de los sitios (Cadereyta) fue posible identificar una pluma de salida de SO_2.

A continuación, se presentan ejemplos de mediciones de cada uno de los sitios como se muestran en la Figuras 68-a la 74.

Figura 63 Medición de NO_2 en Cadereyta realizada el 7 de junio del 2018 entre 15:40 y 15:50 GMT.

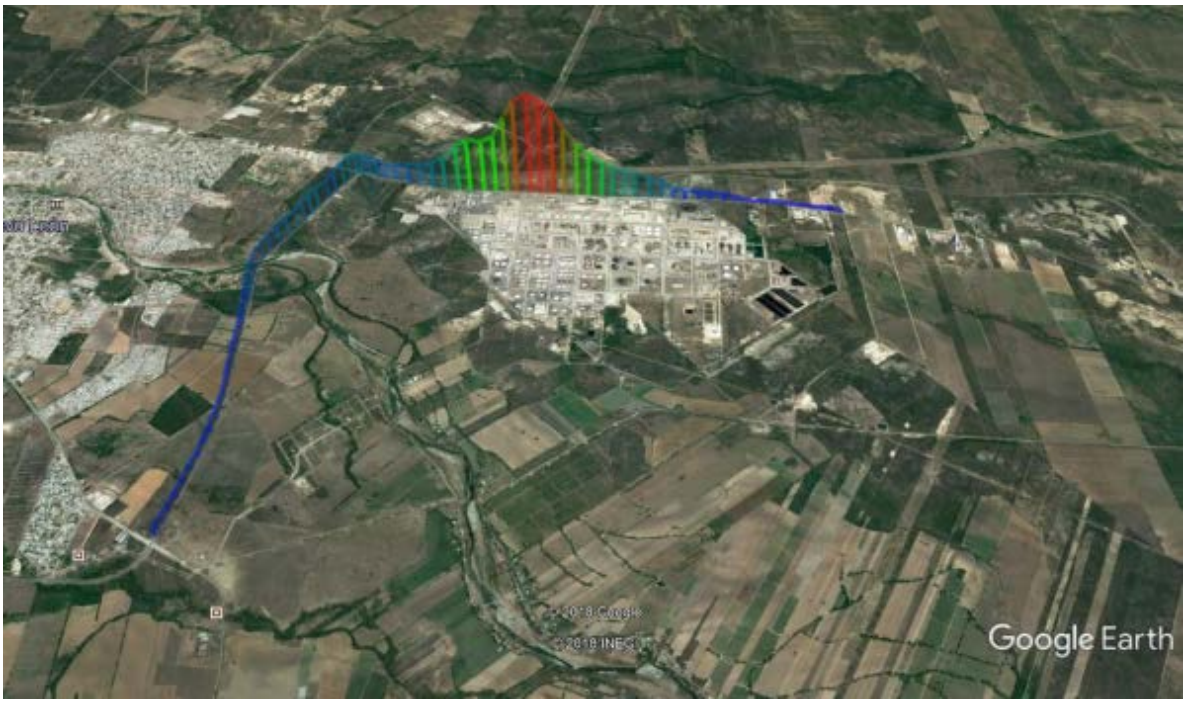


Figura 64 Medición de NO_2 en sitio industrial realizada el 4 de junio del 2018 entre 22:09 y 22:15 GMT

Figura 65 Medición de NO_2 en Centro de la Ciudad realizada el 5 de junio del 2018 entre 12:30 y 12:37 GMT.

Figura 66 Medición de NO_2 en Centro de la Ciudad realizada el 5 de junio del 2018 entre 12:30 y 12:37 GMT.

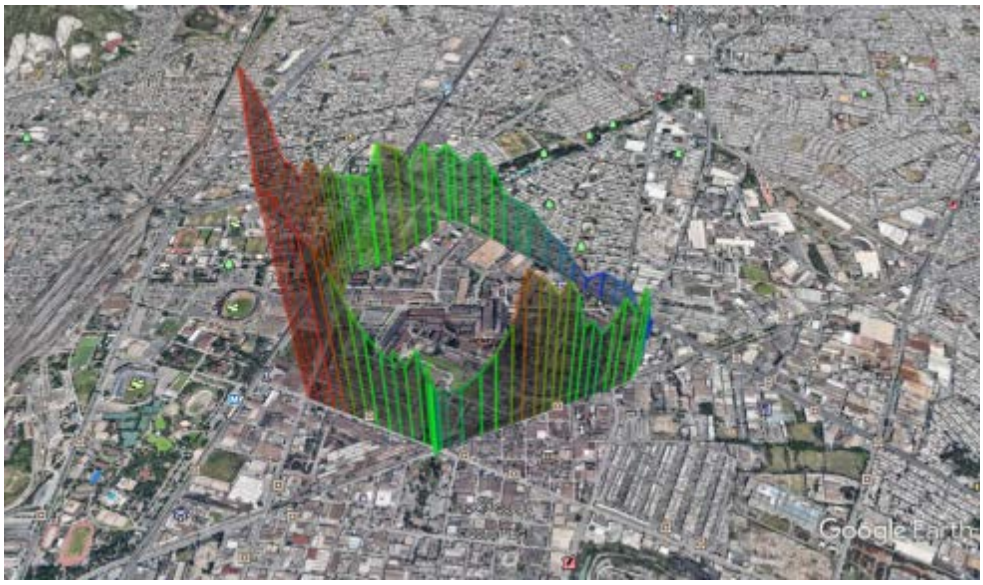


Figura 67 Medición de NO_2 en Centro de la Ciudad realizada el 6 de Junio del 2018 entre 15:41 y 15:48 GMT.

Figura 68 Medición de NO_2 en la Zona Metropolitana de Monterrey realizada el 8 de Junio del 2018 entre 13:10 y 14:15 GMT.

Figura 69 Medición de SO_2 en Cadereyta realizada el 7 de Junio del 2018 entre 16:00 y 16:10 GMT.

11. Resultados de monitoreo de concentraciones en transporte público

11.1 Metro

Los siguientes mapas de concentración de partículas $PM_{2.5}$, fueron hechos con información obtenida en CONAPO, INEGI y del Registro de Emisiones y Transferencia de contaminantes (RETC) de la Semarnat. Las partículas $PM_{2.5}$ mostradas en los mapas, se expresan a través de un perfil de concentración por colores, donde los colores intensos (naranja, rojo y morado) corresponden a concentraciones altas de $PM_{2.5}$ y aquellos colores no tan intensos (escala de grises y blancos) corresponden a las concentraciones de partículas más bajas. (ver Figura 70, Figura 71 y Figura 72)

Figura 70 Concentración de $PM_{2.5}$ en Línea 1 y Línea 2 de Metro Monterey realizados el 6 de junio de 2018 en horas de la mañana

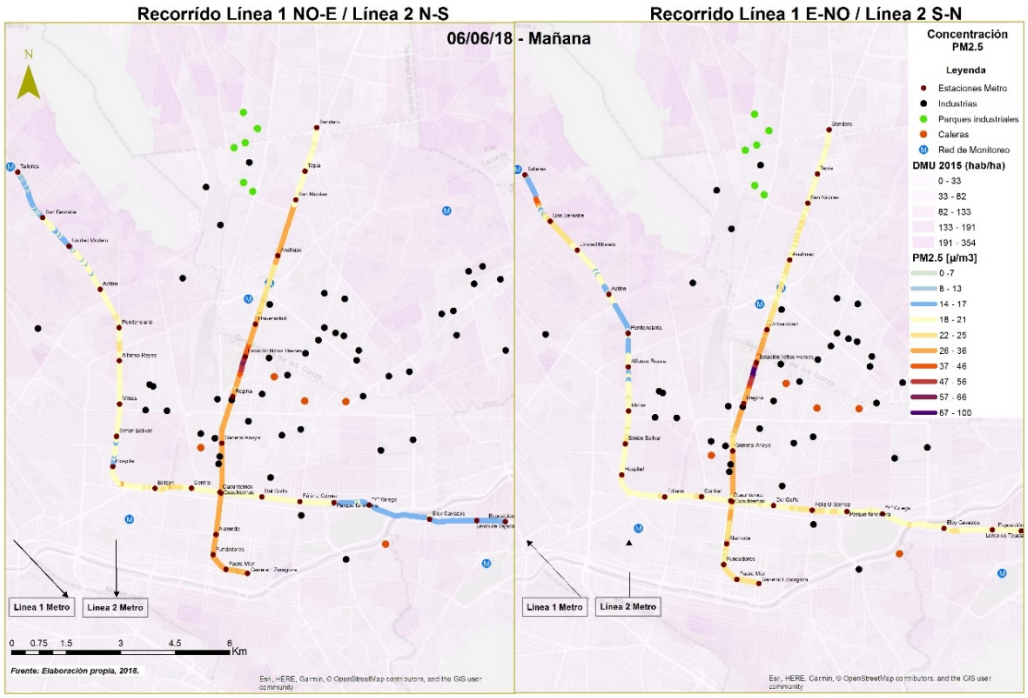


Figura 71 Concentración de $PM_{2.5}$ en Línea 1 y Línea 2 de Metro Monterey realizados el 6 de junio de 2018 en horas de la tarde

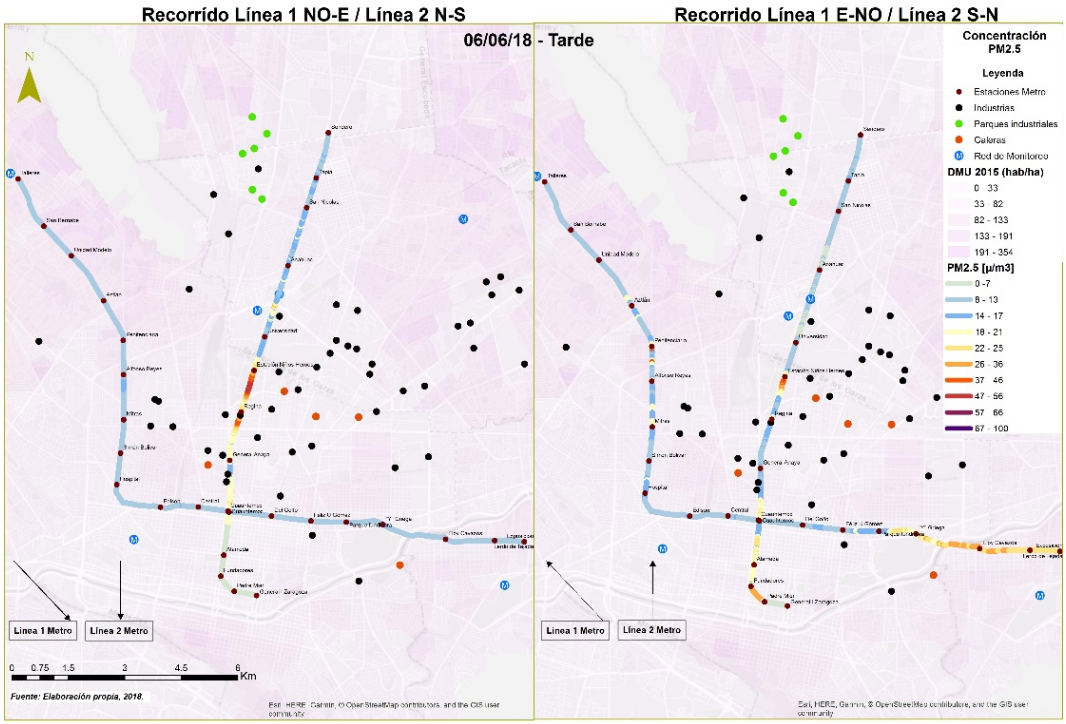
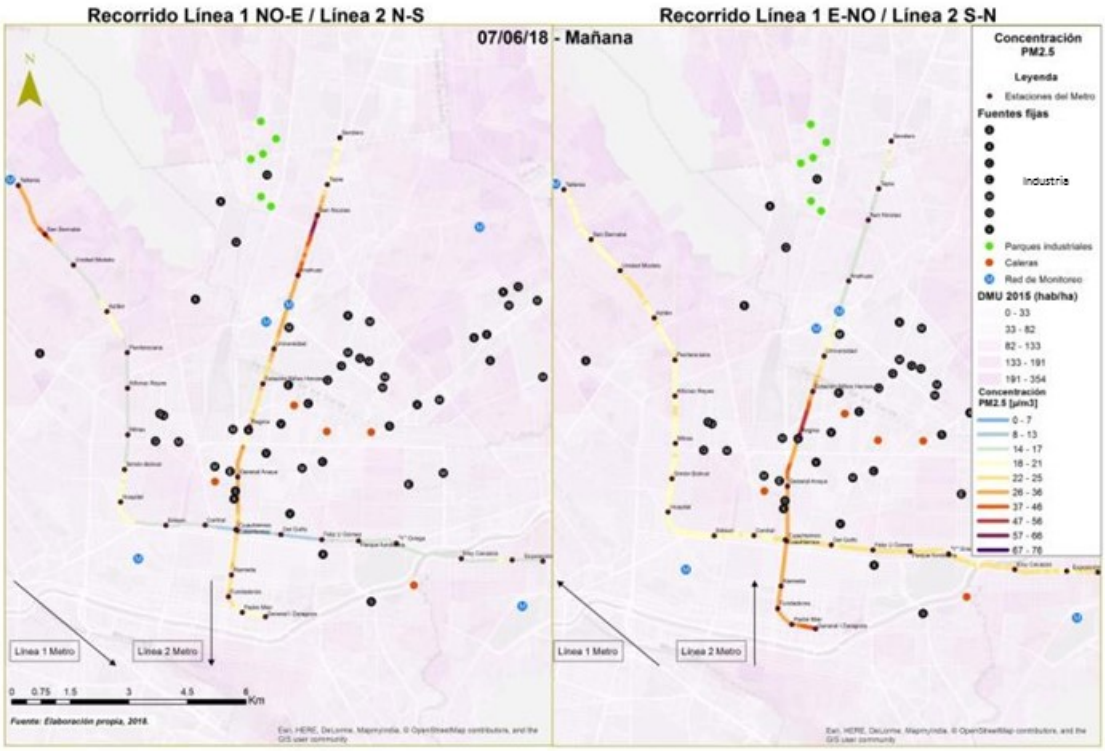


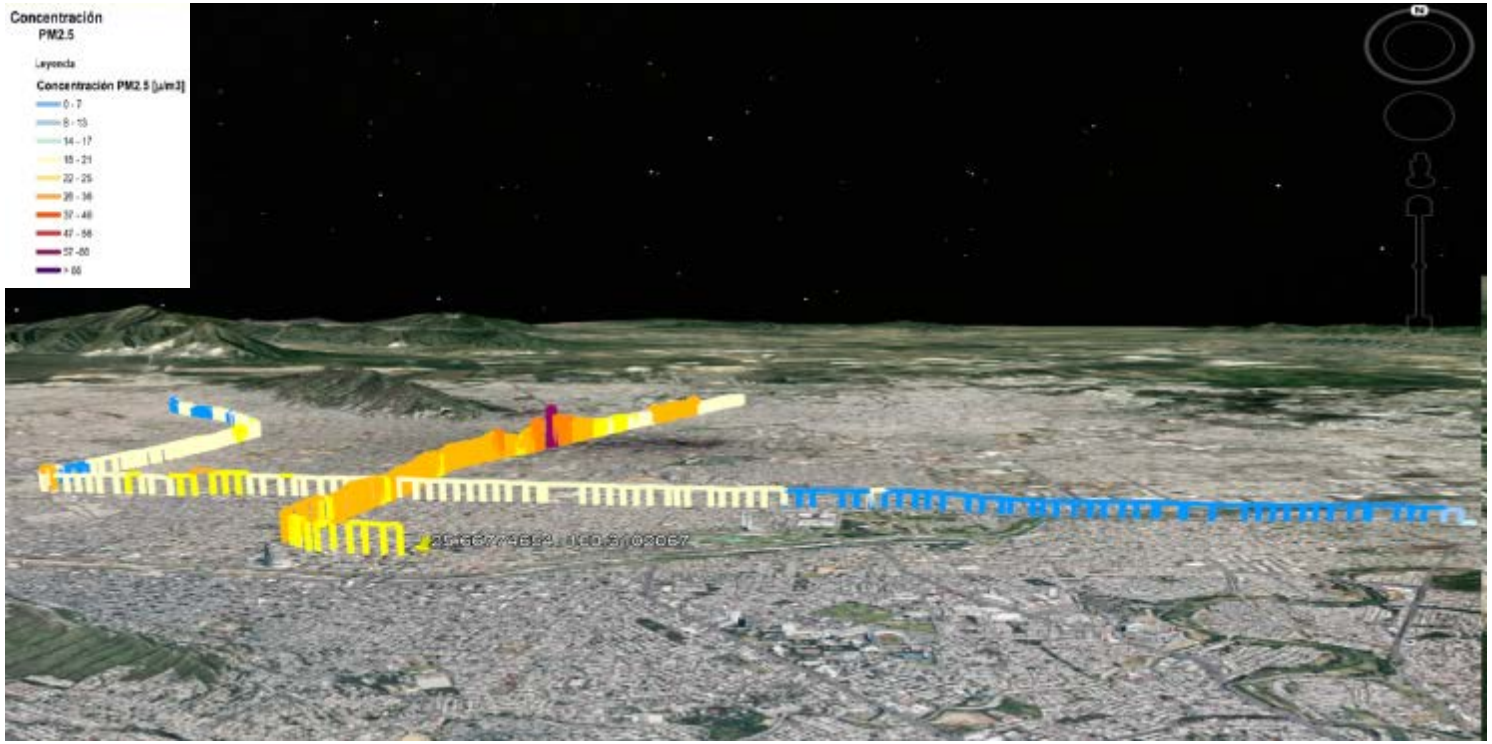
Figura 72 Concentración de $PM_{2.5}$ en Línea 1 y Línea 2 de Metro Monterey realizados el 7 de junio de 2018 en horas de la mañana



A continuación se ven los mapas de concentración tipo barras para partículas $PM_{2.5}$. Este tipo de mapa permite detallar desde otra perspectiva, la influencia de las fuentes cercanas a las concentraciones de $PM_{2.5}$ y las características topográficas de los alrededores

En la Figura 73 se puede ver el perfil de concentración de $PM_{2.5}$ medido en línea 1 y 2 de Metro direcciones E-NO y S-N. En dicho mapa se observa claramente que la línea 2 de Metro presenta las concentraciones más altas de partículas en comparación con la línea 1. Así mismo se ve un segmento con concentraciones superiores a los 100 ug/m^3 (color morado). Esta sección se caracteriza por ser una parte del metro que pasa de ser subterránea a aéreo y las altas concentraciones de $PM_{2.5}$, podrían ser producto de fenómenos de acumulación en túneles.

Figura 73 Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas el 6 de junio de 2018 en horas de la mañana, recorrido E-NO y S-N



En la Figura 74, se puede ver el perfil de concentración de $PM_{2.5}$ medido en línea 1 y 2 de Metro direcciones E-NO y S-N. En dicho mapa se observa claramente que la línea 2 de Metro presenta las concentraciones más altas de partículas en comparación con la línea 1. Así mismo se ve un segmento con concentraciones superiores a los 100 ug/m^3 (color morado). Esta sección se caracteriza por ser una parte del metro que pasa de ser subterránea a aéreo y las altas concentraciones de $PM_{2.5}$, podrían ser producto de fenómenos de acumulación en túneles.

Figura 74 Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas el 6 de Junio de 2018 en horas de la mañana, recorrido NO-E y N-S

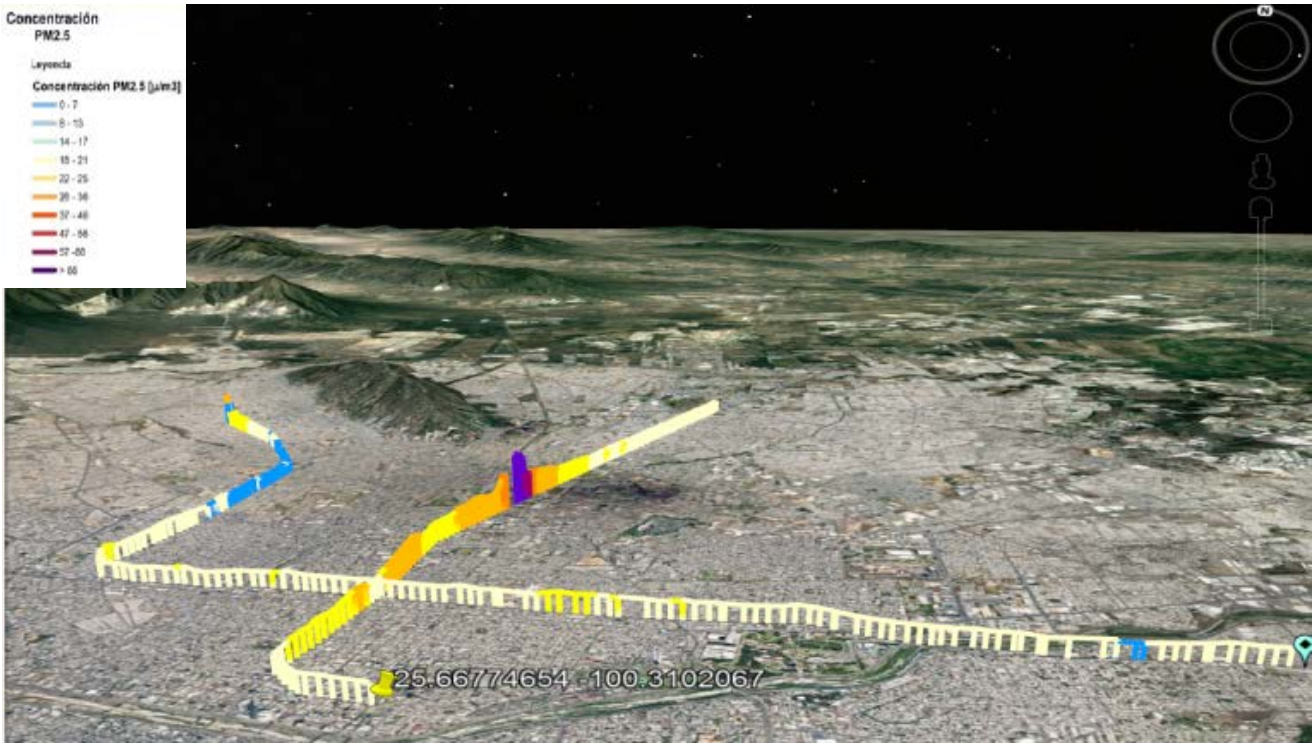


Figura 75 Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas el 6 de Junio de 2018 en horas de la tarde, recorrido E-NO y S-N

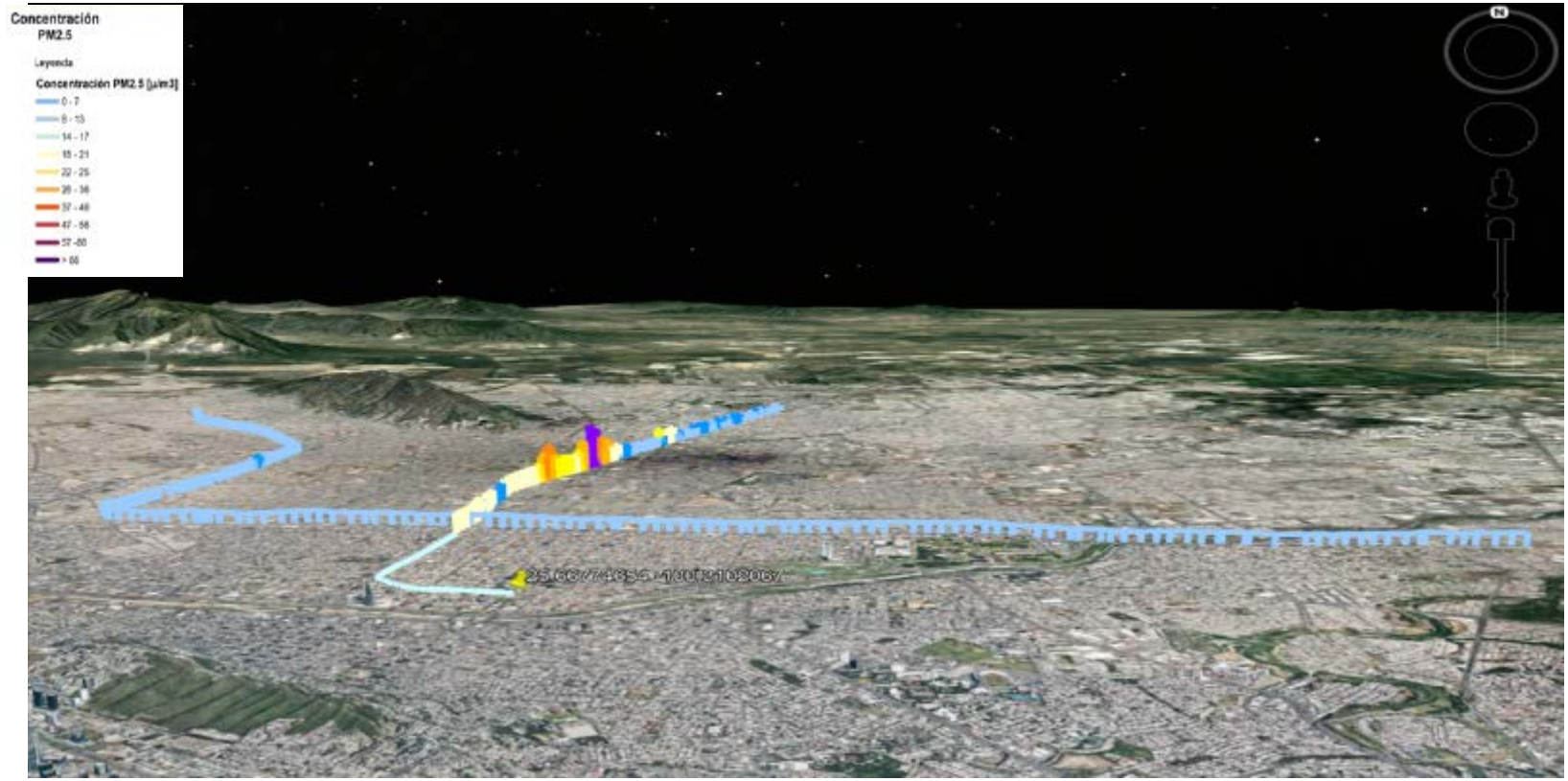
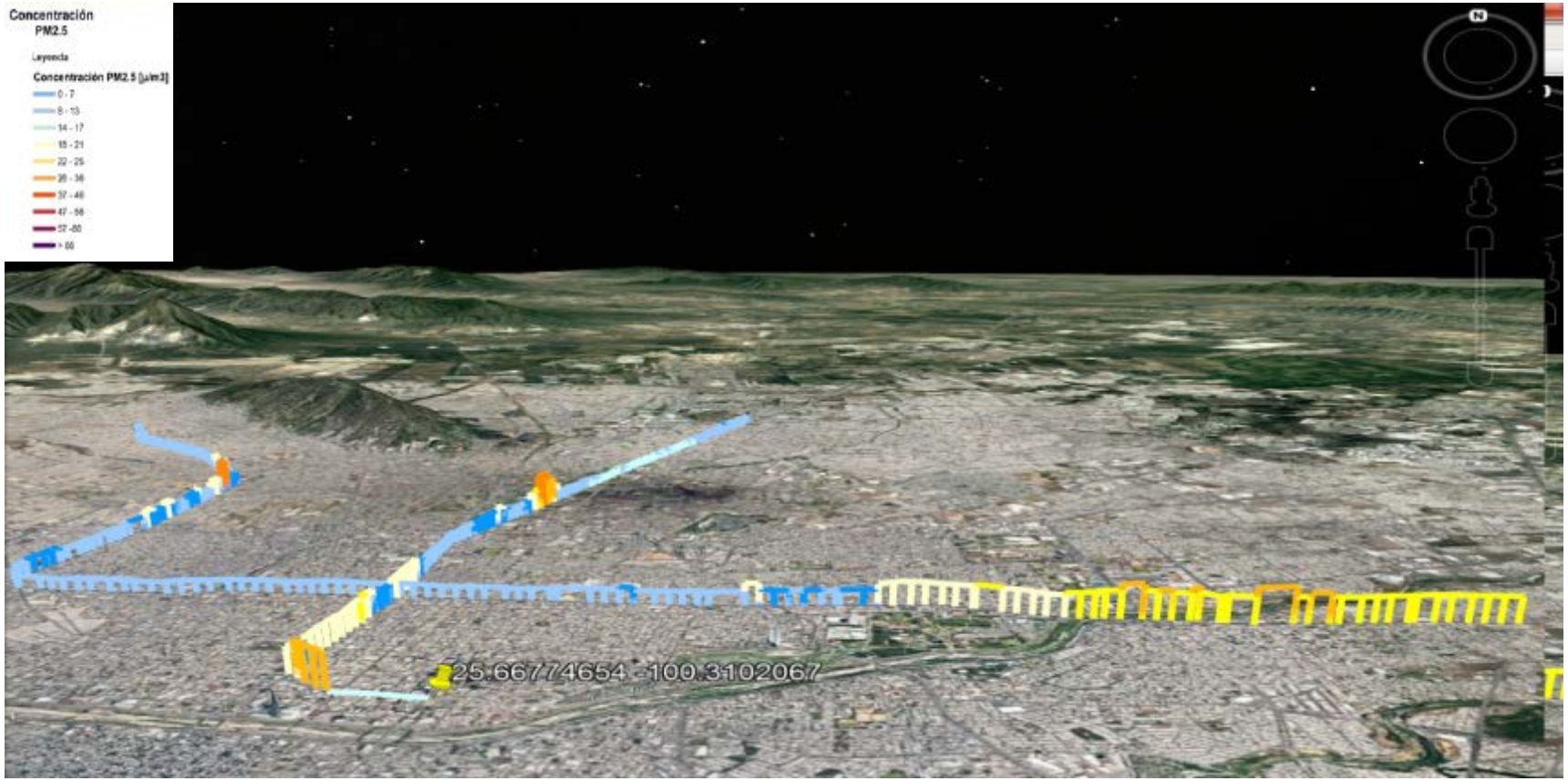


Figura 76 Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas el 6 de Junio de 2018 en horas de la tarde, recorrido NO-E y N-S



Comparando la Figura 73 con la Figura 75, se logró apreciar que las concentraciones en horas de la tarde son menores que en horas de la mañana, este fenómeno puede estar influenciado por condiciones meteorológicas, en donde, en horas de la mañana, la capa de mezcla es baja, lo cual permite la acumulación progresiva de contaminantes que en horas de la

tarde se diluyen debido al incremento de la altura y volúmen de la capa de mezcla. Así mismo se logra apreciar, como la sección de metro de la Línea 2 que va de subterránea a aerea presenta concentraciones superiores al promedio de las concentraciones medidas a lo largo de la misma Linea.

Figura 77 Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas el 7 de Junio de 2018 en horas de la mañana, recorrido E-NO y S-N

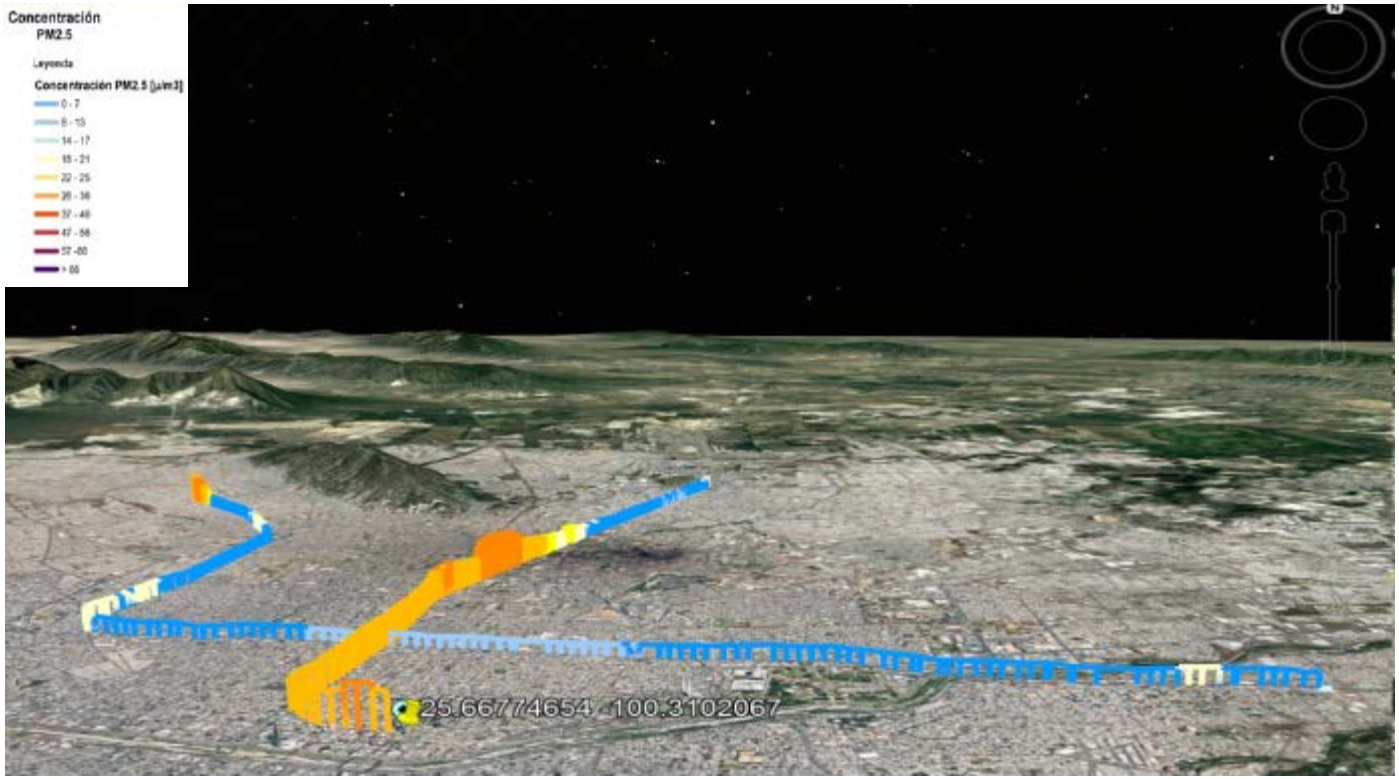


Figura 78 Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas el 7 de Junio de 2018 en horas de la mañana, recorrido NO-E y N-S

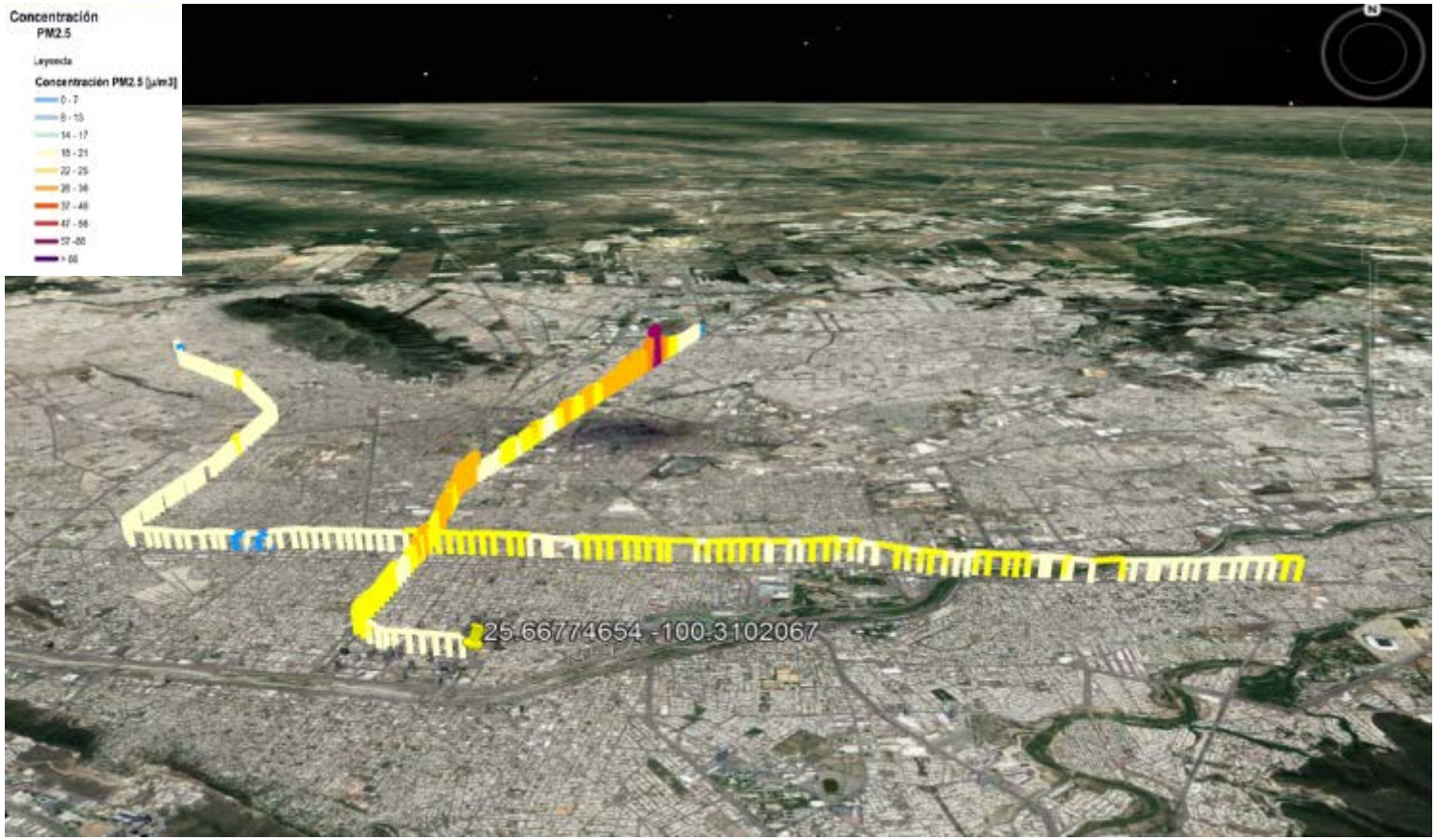


Figura 79 Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas el 9 de Junio de 2018 en horas de la mañana, recorrido E-NO y S-N

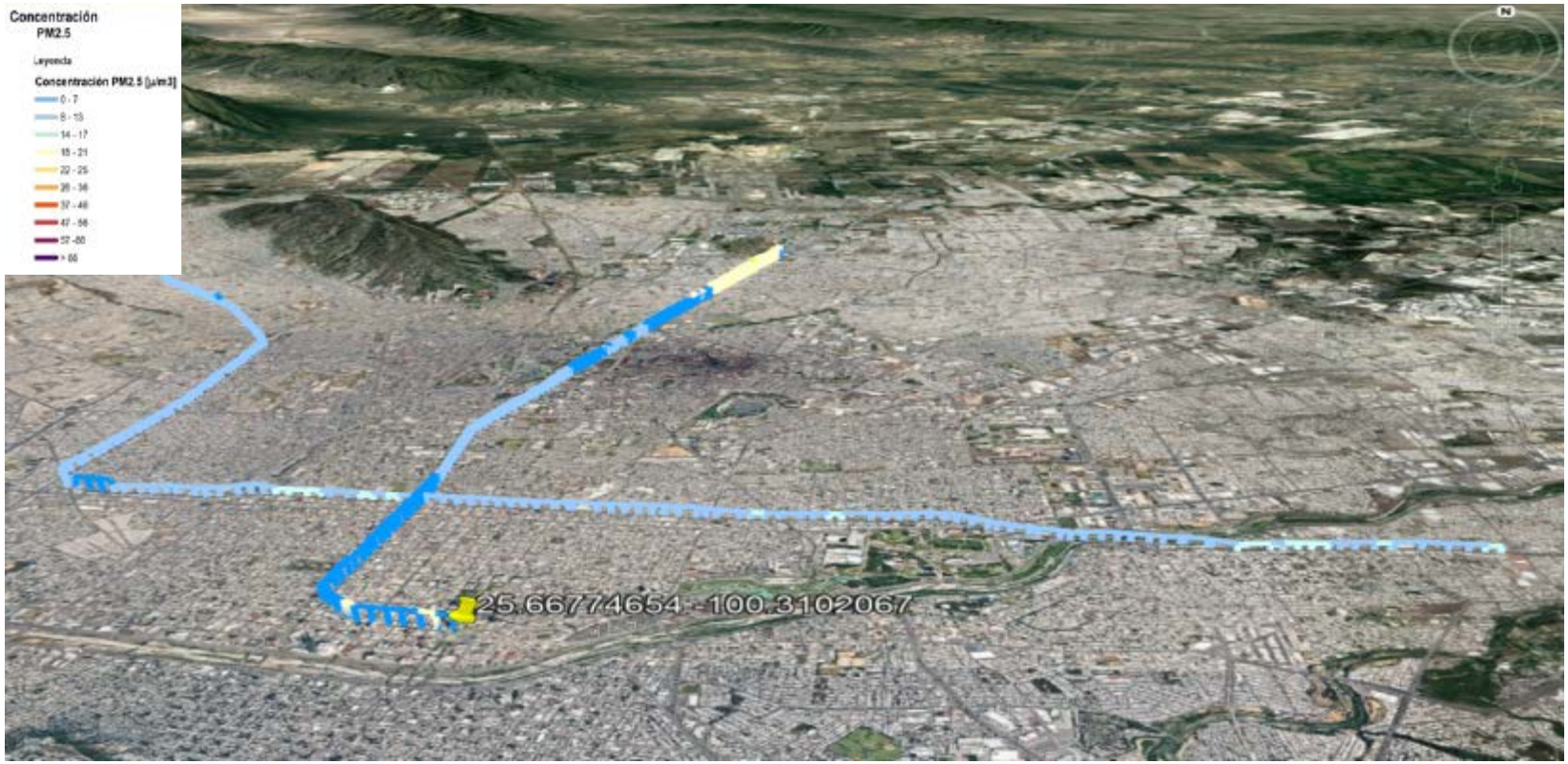
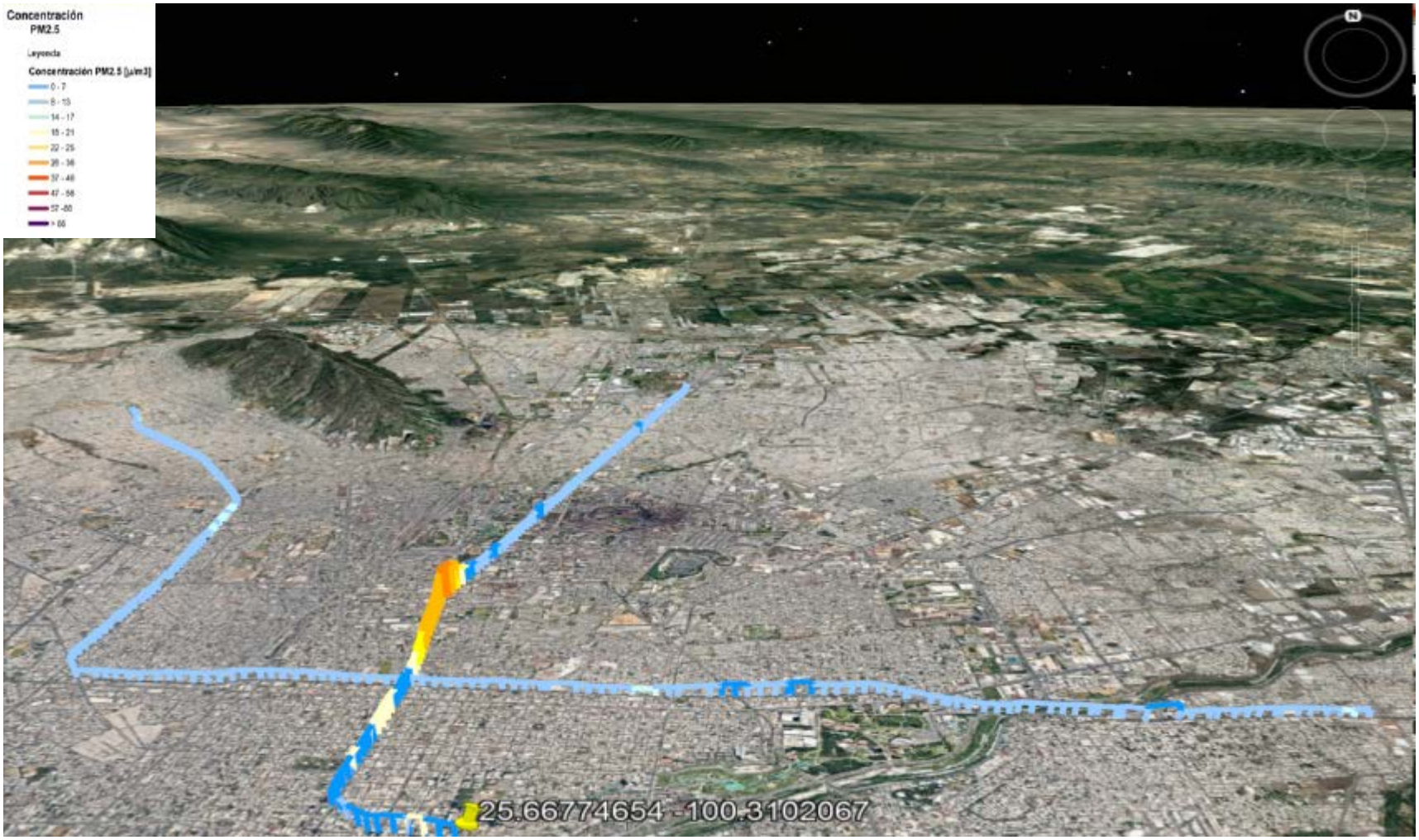


Figura 80 Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas el 9 de Junio de 2018 en horas de la mañana, recorrido NO-E y N-S



11.2 Distribución de concentraciones de $PM_{2.5}$ en Metrorrey

De los resultados generales observados en el monitoreo de partículas $PM_{2.5}$ en Metrorrey resaltó el fenómeno de alta concentración en la sección de la línea 2 que pasaba de ser metro subterráneo a metro elevado. Así mismo se observó que las concentraciones de partículas en horas de la mañana eran superiores a las medidas en horas de la tarde, este comportamiento pudo deberse a meteorología relacionado con la altura de capa de mezcla que es menor en horas de la mañana y al tráfico vehicular que varía en horas de la tarde (es decir, el horario de entrada de los trabajadores y estudiantes puede ser el mismo en horas de la mañana, sin embargo el horario de salida es diferente). Así mismo durante el monitoreo, resaltaron las altas concentraciones medidas en estaciones cercanas a fuentes fijas. Dichas fuentes podrían estar influyendo en las concentraciones de $PM_{2.5}$ a lo largo de las estaciones cercanas y viento arriba. (Ver Figura 81 y Tabla 17)

Figura 81 Diagrama de caja y bigotes del monitoreo de partículas $PM_{2.5}$ en Metrorrey (Línea 1 y Línea 2)

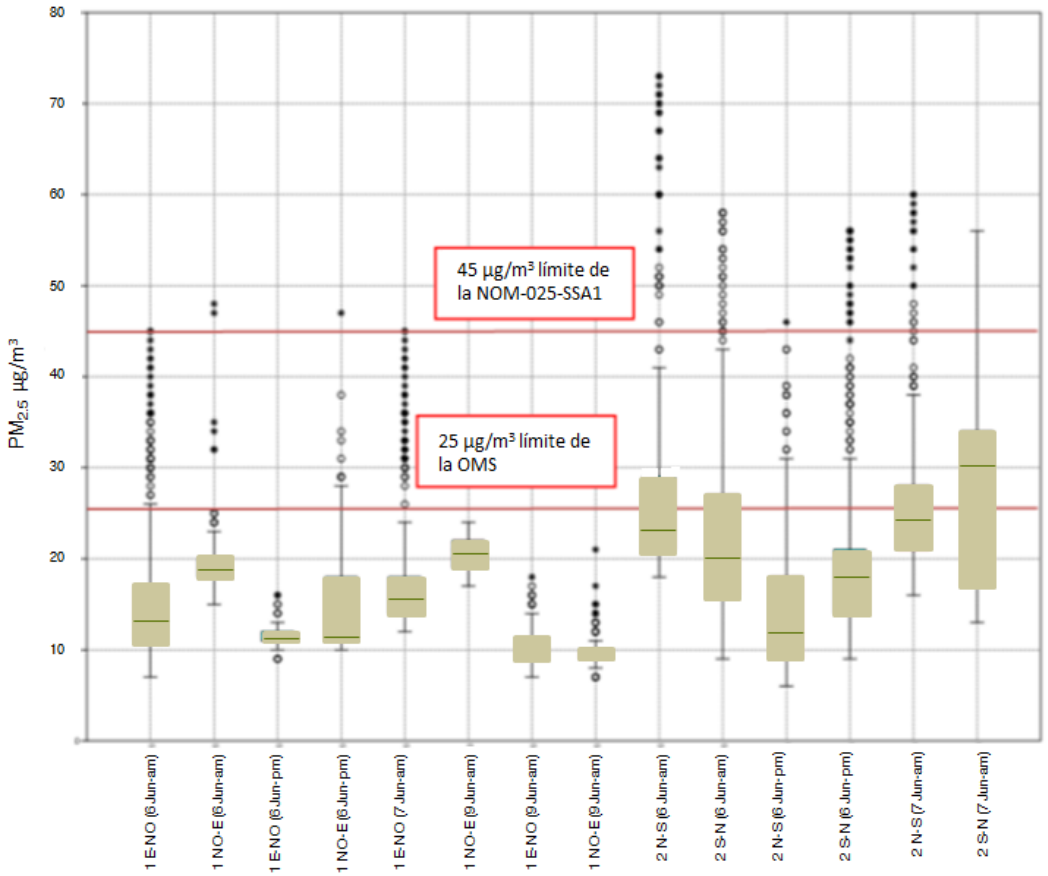


Tabla 17. Estadísticos Metro

	Estadísticos Metro								
	Línea 1 NO-E (7 Junio-mañana)	Línea 1 E-NO (9 Junio-mañana)	Línea 1 NO-E (9 Junio-mañana)	Línea 2 N-S (6 Junio-mañana)	Línea 2 S-N (6 Junio-mañana)	Línea 2 N-S (6 Junio-tarde)	Línea 2 S-N (6 Junio-tarde)	Línea 2 N-S (7 Junio-mañana)	Línea 2 S-N (7 Junio-mañana)
N	510	510	510	675	1350	675	675	675	675
Min	17	7	7	18	9	0	0	16	13
Max	24	18	21	73	58	46	56	60	56
Mean	20.67	9.88	9.51	26.34	21.78	12.32	14.48	25.69	28.57
Median	21	9	9	23	20	11	14	24	30
25 percentil	19	9	9	21	16	8	0	21	17
75 percentil	22	11	10	29	27	17	19	28	34

11.3 Ecovía

A continuación se observan los mapas de concentración de $PM_{2.5}$ medidos en Ecovía. (Ver Figura 87 a 90)

Figura 82 Mapas de concentración de $PM_{2.5}$ en Ecovía realizados el 6 de Junio de 2018 en horas de la mañana

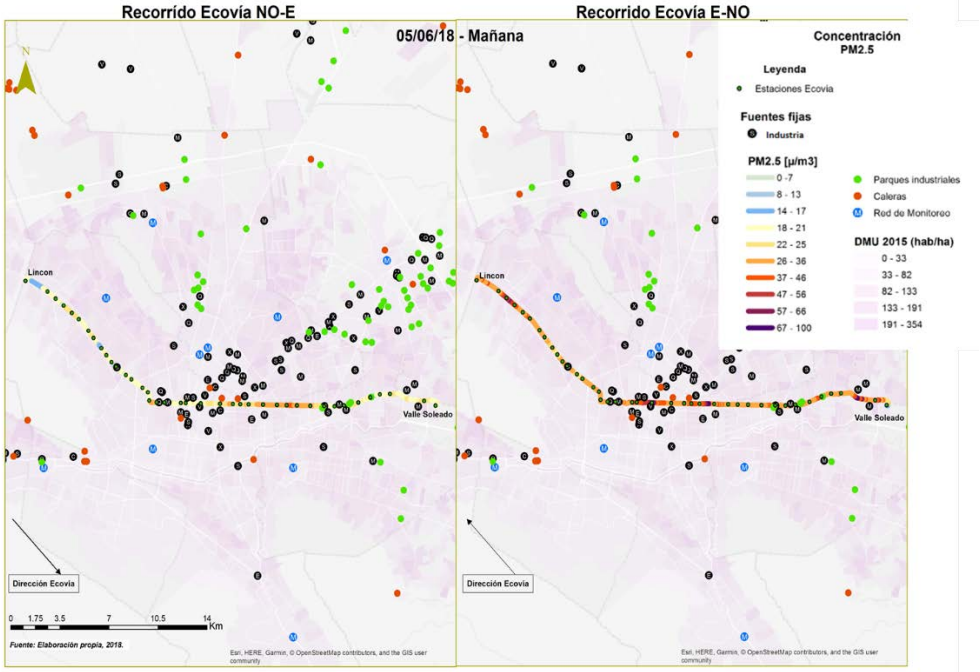


Figura 83 Mapas de concentración de $PM_{2.5}$ en Ecovía realizados el 5 de Junio de 2018 en horas de la tarde

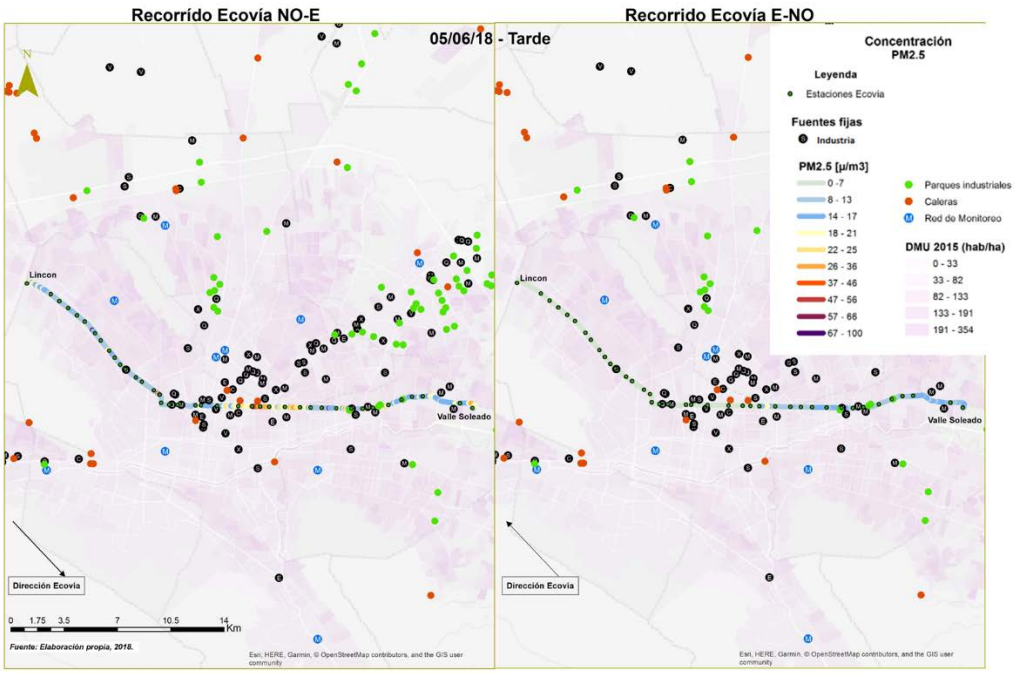


Figura 84 Mapas de concentración de $PM_{2.5}$ en Ecovía realizados el 8 de Junio de 2018 en horas de la mañana

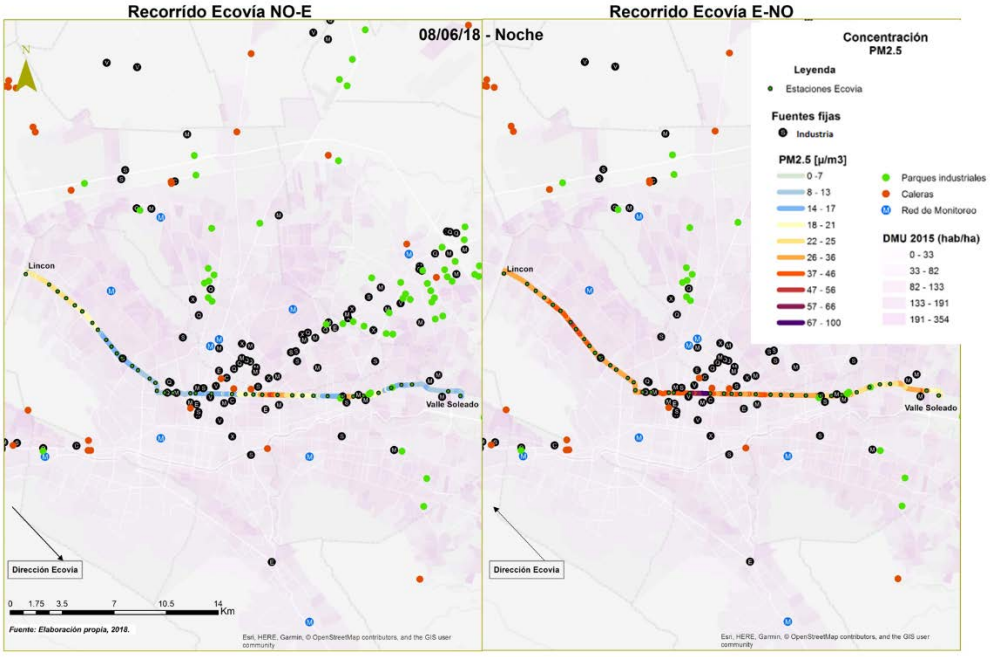
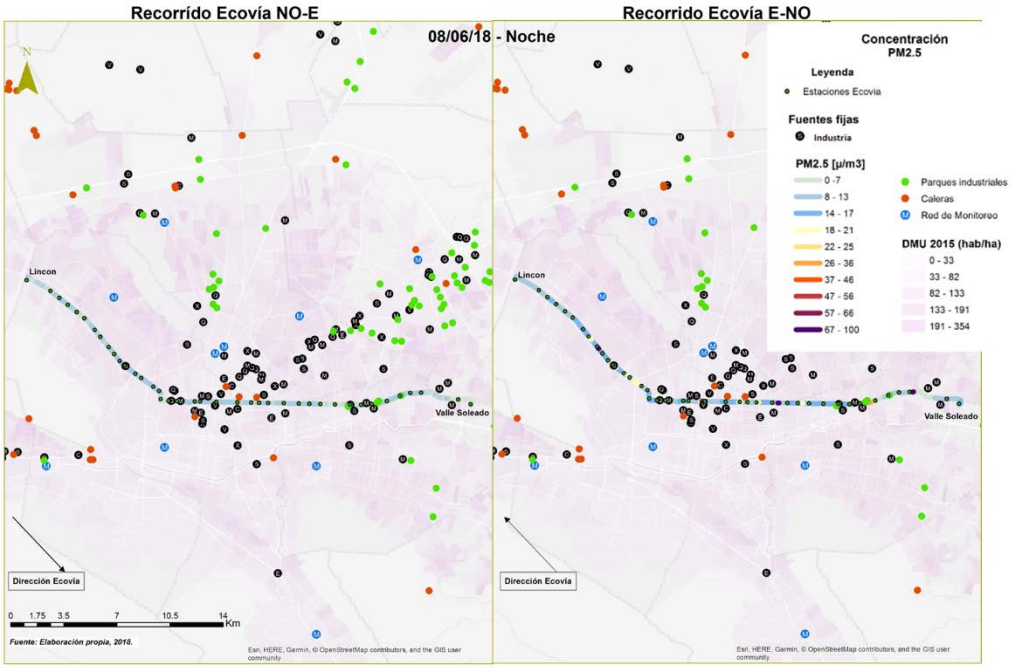


Figura 85 Mapas de concentración de $PM_{2.5}$ en Ecovía realizados el 8 de Junio de 2018 en horas de la noche



A continuación se presentan los mapas de concentración tipo barra para el sistema de transporte de Ecovía de Monterrey. (Figura 86 a Figura 93)

Figura 86 Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas el 5 de Junio de 2018 en horas de la mañana, recorrido E- NO

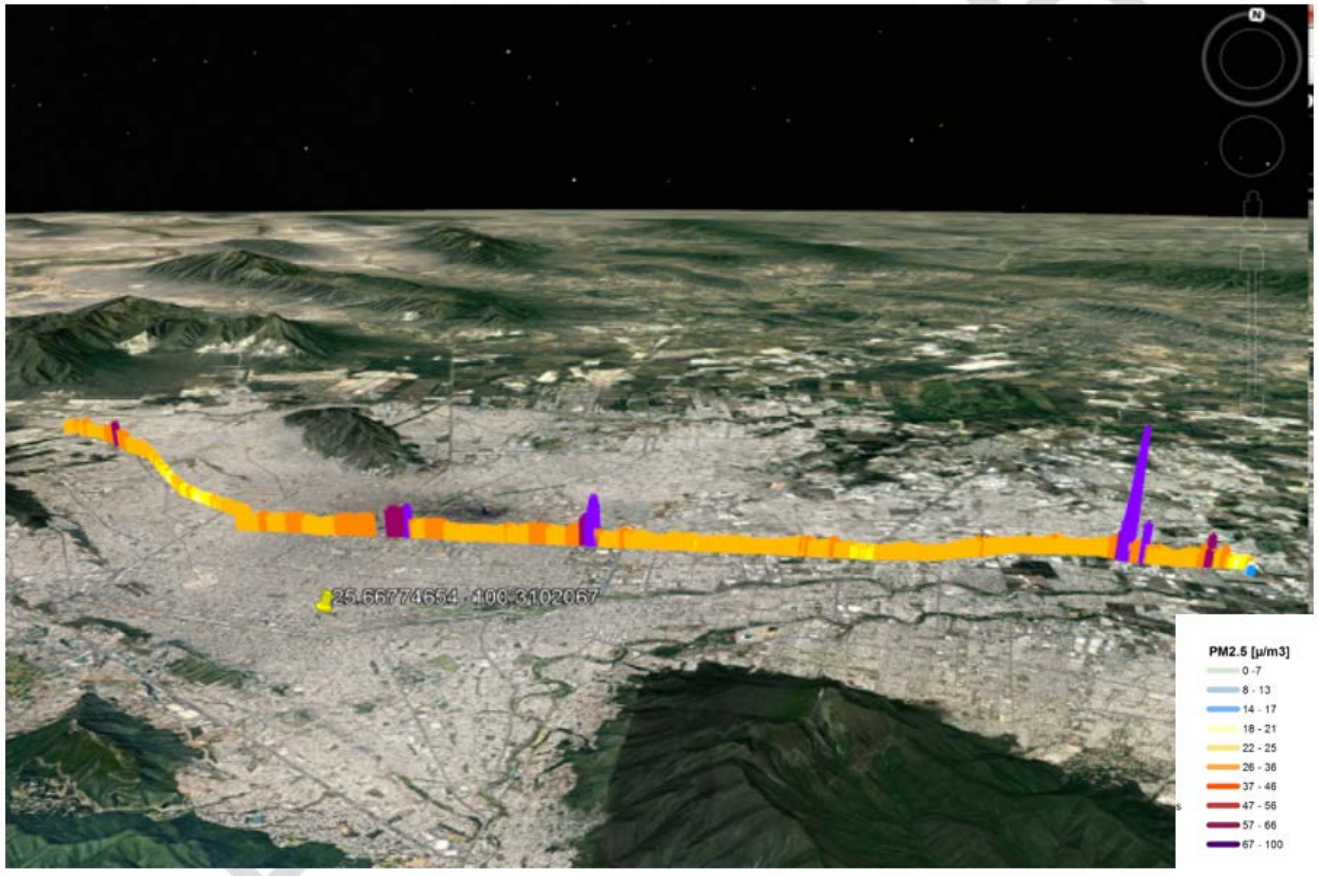


Figura 87 Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas el 5 de Junio de 2018 en horas de la mañana, recorrido NO-E

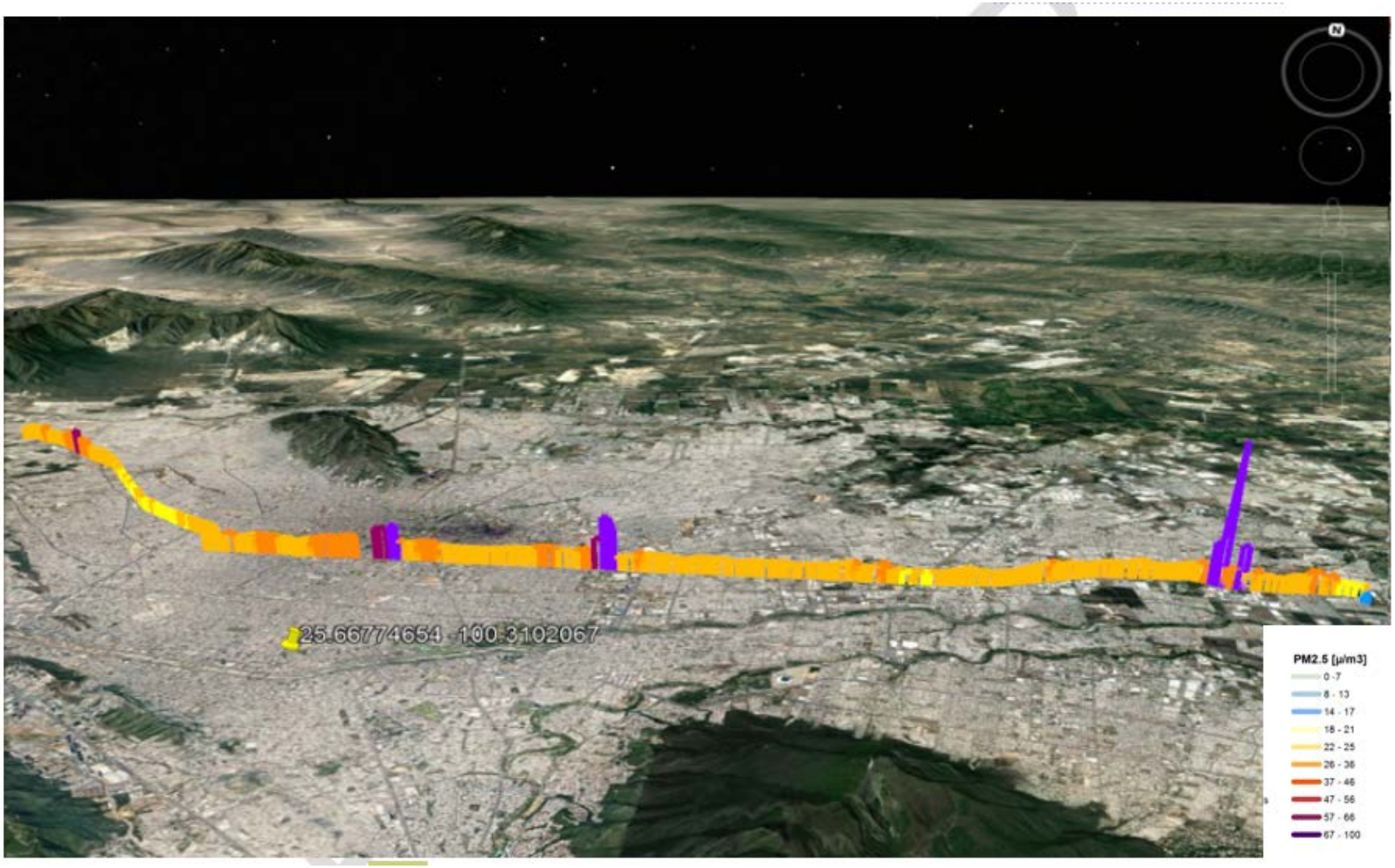


Figura 88 Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas el 5 de Junio de 2018 en horas de la tarde recorrido E-NO

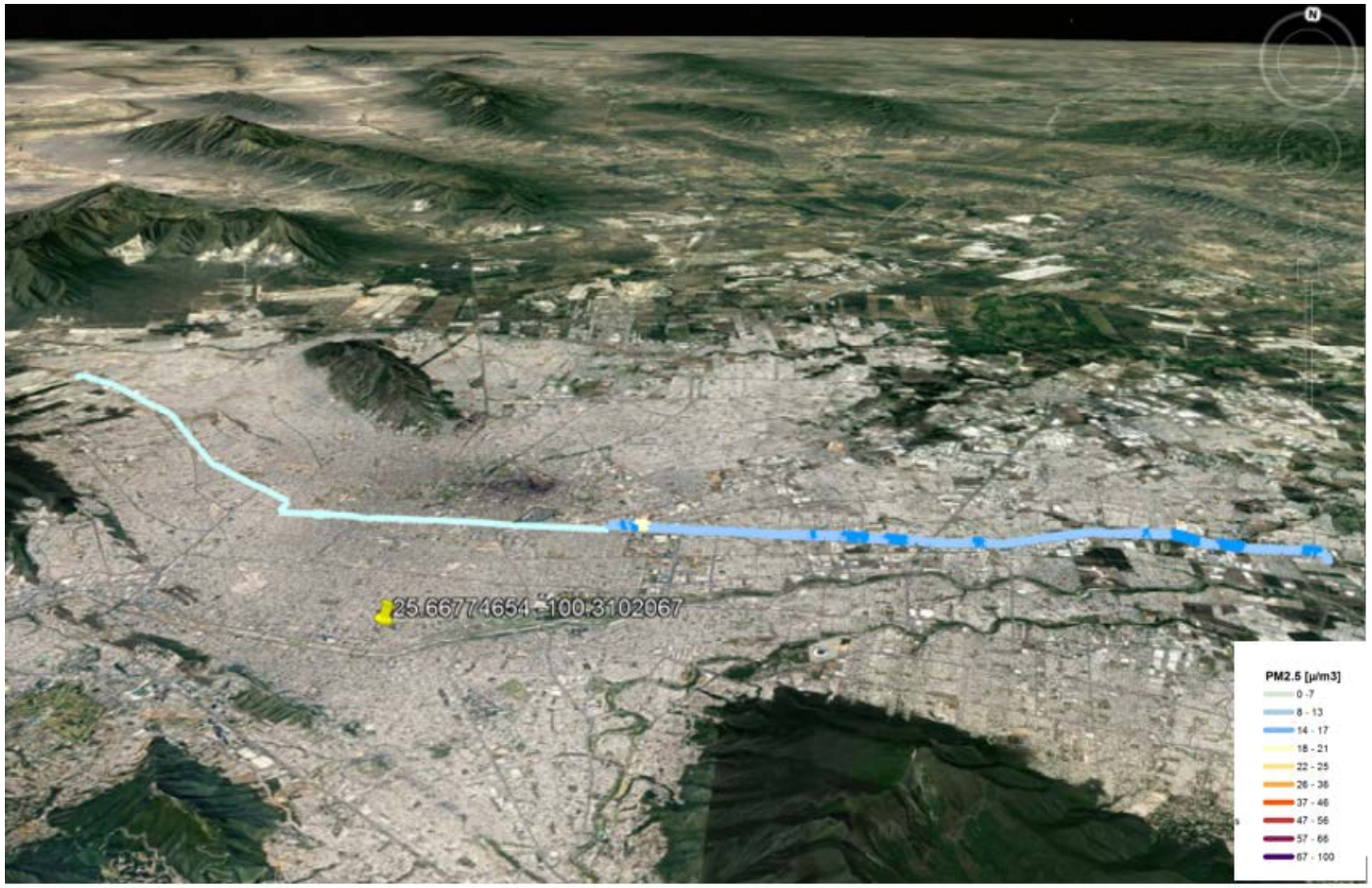


Figura 89 Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas el 5 de Junio de 2018 en horas de la tarde recorrido NO-E

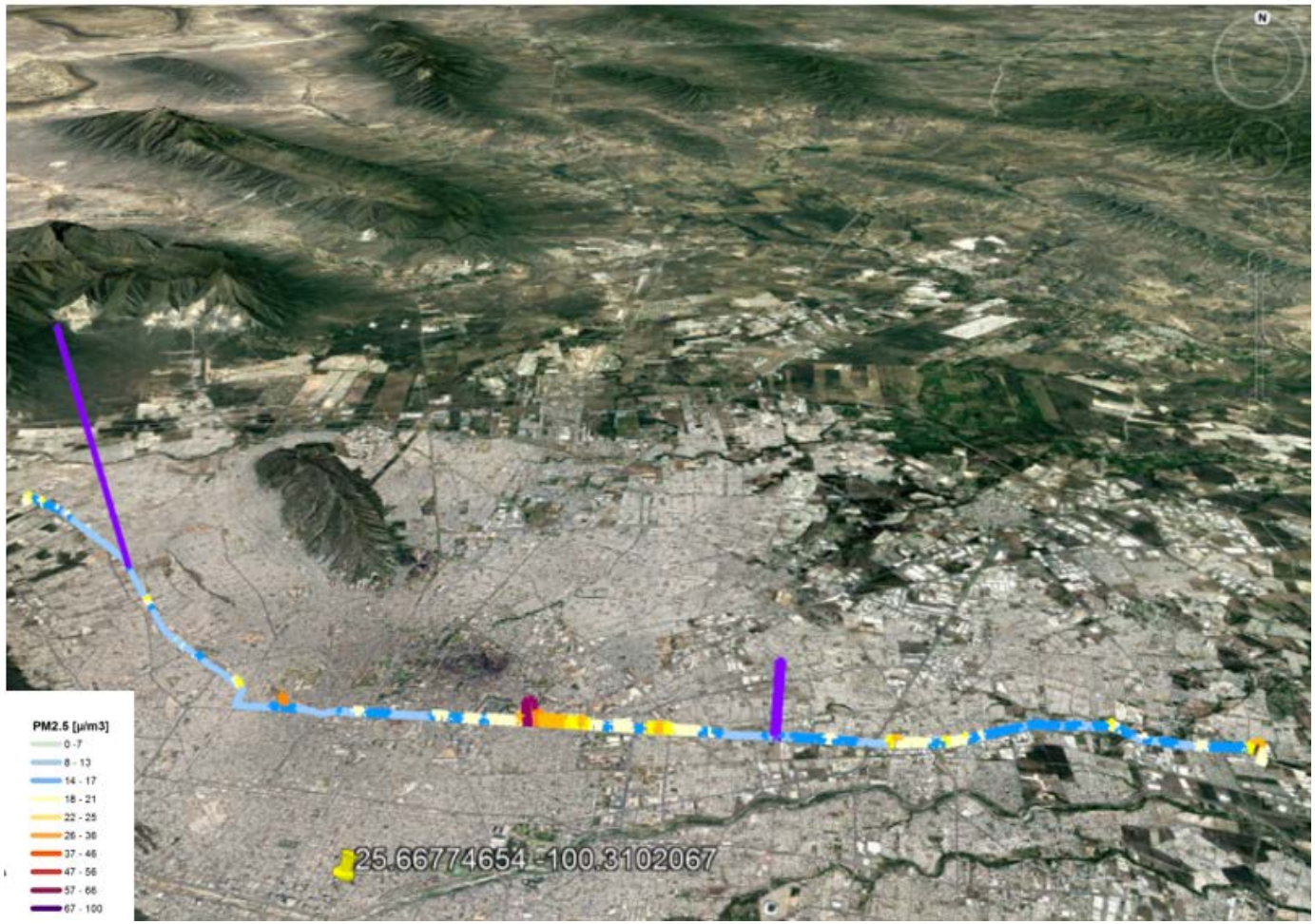


Figura 90 Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas el 8 de Junio de 2018 en horas de la mañana recorrido E-NO

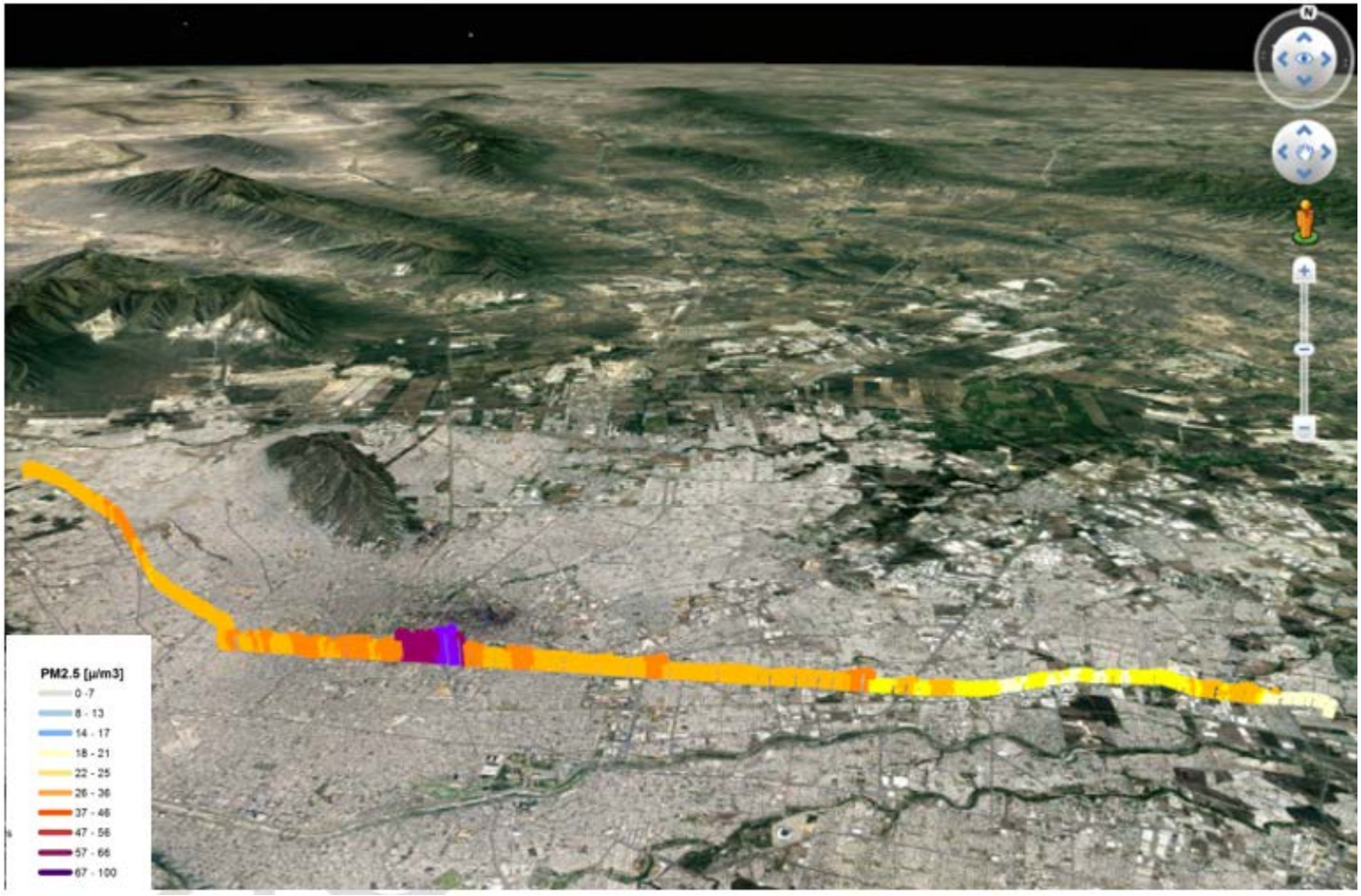


Figura 91 Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas el 8 de Junio de 2018 en horas de la mañana recorrido NO-E

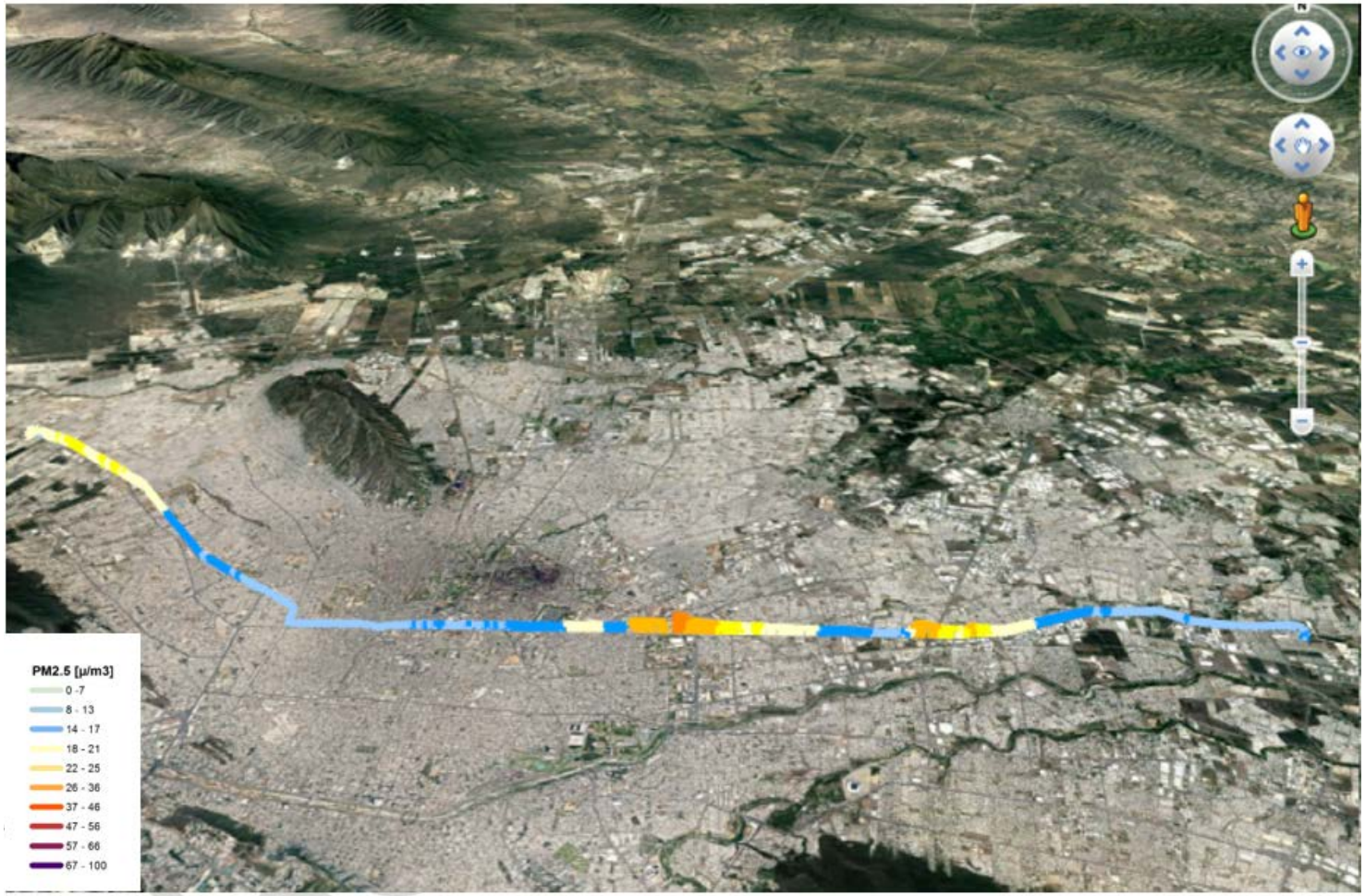


Figura 92 Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas el 8 de Junio de 2018 en horas de la noche recorrido E-NO

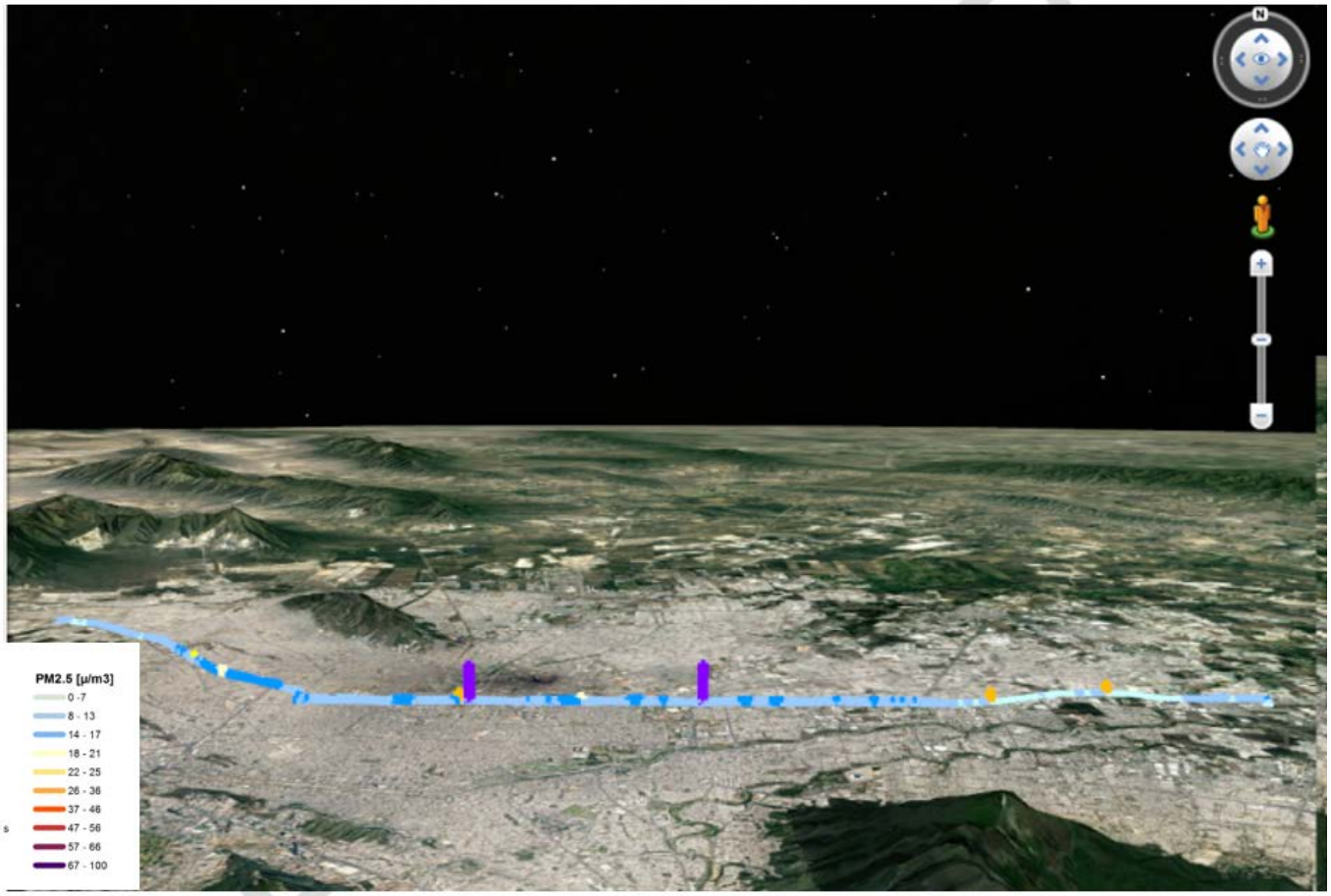
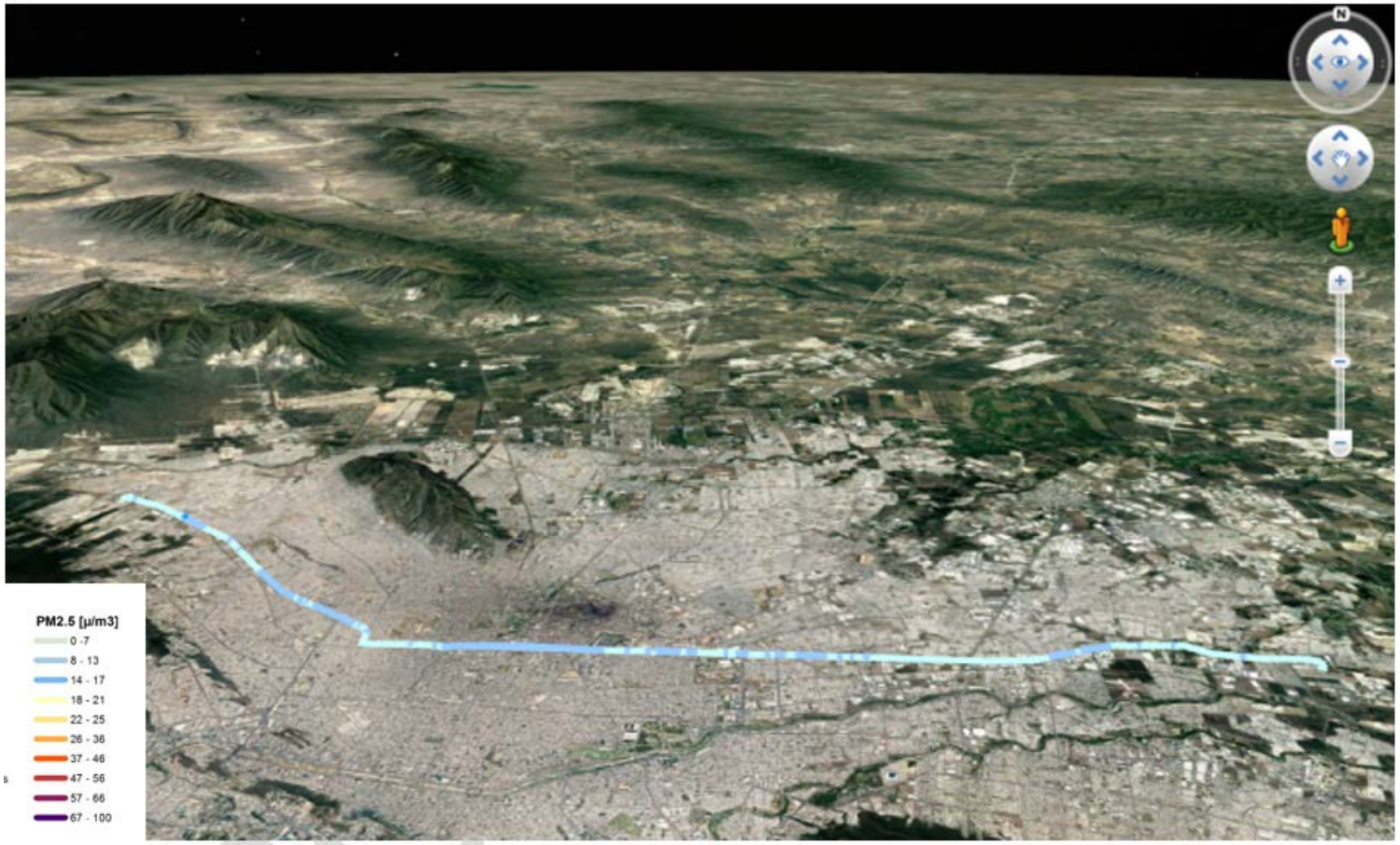
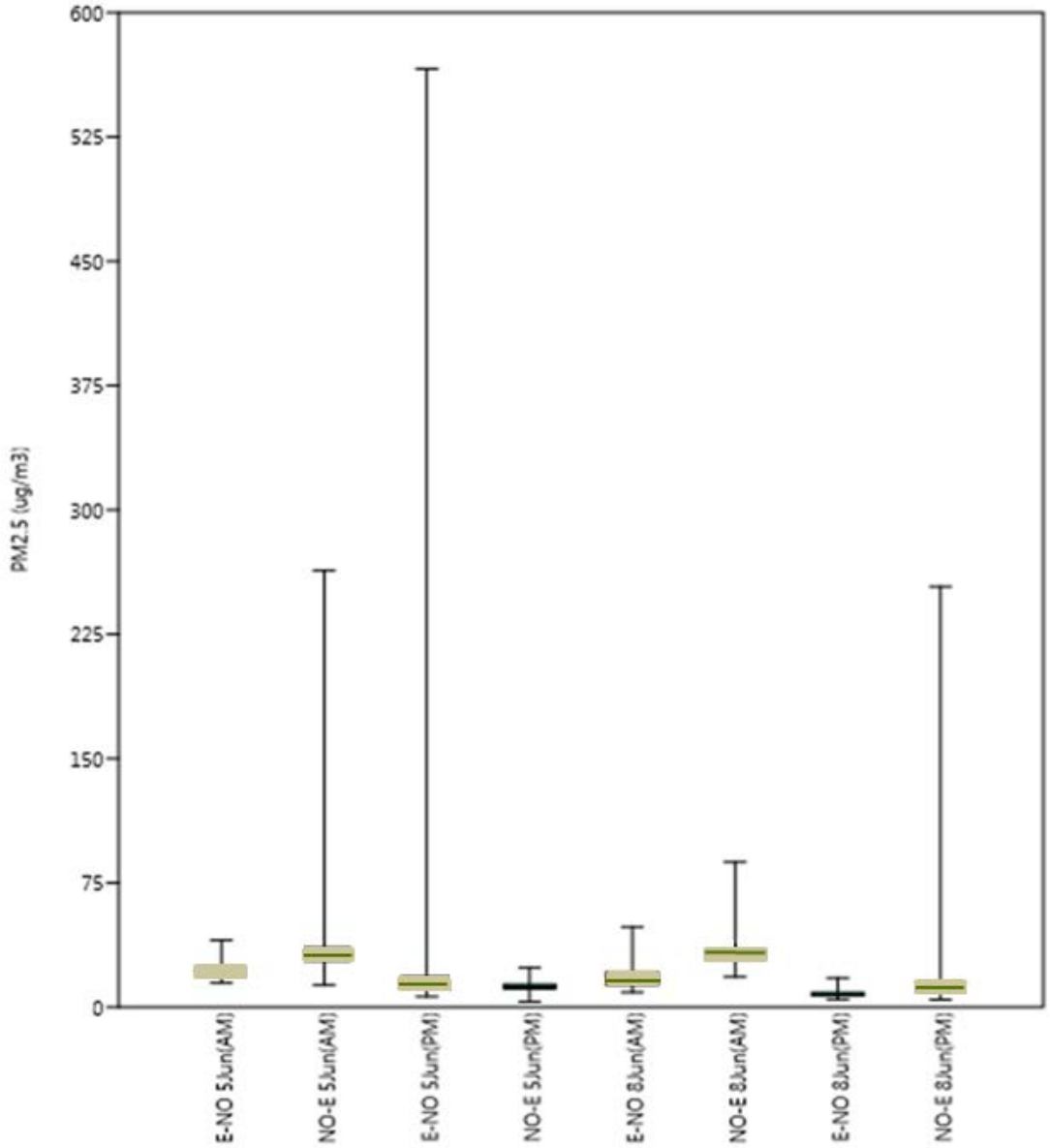


Figura 93 Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas el 8 de Junio de 2018 en horas de la noche recorrido NO-E



A continuación se resumen los resultados en la Figura 99

Figura 94 Diagrama de caja y bigotes del monitoreo de partículas $PM_{2.5}$ en Ecovía



La Tabla 21 sintetiza los datos estadísticos obtenidos de la Figura 99

Tabla 18. Estadísticos Ecovía

Estadísticos $PM_{2.5}$ Ecovía						
	E-NO 5 de Junio pm	NO-E 5 de Junio pm	E-NO 8 de Junio am	NO-E 8 de Junio am	E-NO 8 de Junio pm	NO-E 8 Junio pm
N datos	935	935	935	935	935	935
Min	6.45	0	8.92	18.34	4.66	4.41
Max	566.09	23.83	48.47	87.57	17.64	253.72

Estadísticos $PM_{2.5}$ Ecovía						
	E-NO 5 de Junio pm	NO-E 5 de Junio pm	E-NO 8 de Junio am	NO-E 8 de Junio am	E-NO 8 de Junio pm	NO-E 8 Junio pm
Promedio	17.07	4.72	17.71	33.70	7.91	12.73
Mediana	14.9	0	16.64	33.84	7.67	11.95
25 percentil	11.22	0	13.37	28.47	6.94	9.54
75 percentil	18.65	11.42	21.13	36.95	8.75	14.09

Los resultados de monitoreo obtenidos para cada uno de los recorridos hechos en Ecovía, presentaron un comportamiento de alta concentración de partículas $PM_{2.5}$ en horas de la mañana y concentraciones más bajas en horas de la tarde; estos patrones son producto de tráfico vehicular y meteorología. Así mismo, las estaciones cercanas a fuentes fijas, presentaron concentraciones elevadas para algunos trayectos (Figura 86 a Figura 93).

12. Líneas estratégicas

En esta sección se presentaran las líneas estratégicas en el tema de contaminación por $PM_{2.5}$ en el Área Metropolitana de Monterrey, estas medidas en base a los resultados obtenidos durante la campaña de mediciones que se llevó a cabo en el mes de junio del 2018, a continuación se incluyen cuatro tablas con las posibles medidas por tipo de fuente y otras medidas, algunas de esas medidas han sido propuestas y aplicadas en otros países, sin embargo con la información que se dispone ahora, cobran relevancia por su efectividad en control de emisiones y/o por la urgencia de aplicar medidas en la región para el bienestar de la población expuesta.

Los estudios que se han realizado sobre caracterización de partículas en el AMM son muy escasos, por lo que éste estudio coadyuvará a tener un panorama de las posibles fuentes de emisión de los compuestos que forman las partículas en el AMM. Sin embargo, es y será necesario realizar campañas de mayor duración y de manera periódica para observar todos los cambios en las diferentes épocas del año y el comportamiento de los contaminantes en diferentes temporalidades, así como, que se realicen mediciones y monitoreo en diferentes puntos del AMM para generar más datos de transformación y transporte de los principales contaminantes a escala local y regional y crear una red de información suficientemente amplia, para que se realicen diferentes estudios cada vez más detallados de la calidad del aire en la región.

En la actualidad la política ambiental en nuestro país se ve en la necesidad de desarrollar medidas de control y estrategias integrales, intersectoriales y de coordinación intergubernamental para ayudar a resolver este problema complejo y multifactorial como lo es la contaminación del aire por material particulado.

A continuación (Tabla 19) se proponen medidas las diferentes fuentes en el AMM, así como otras medidas que involucran a la población, investigadores, instituciones de salud, etcétera.

12.1 Medidas propuestas aplicables a Fuentes Fijas

El ostensible problema de mala calidad en el AMM, es generado en gran parte por las fuentes fijas y sus emisiones, en este estudio de caracterización de material particulado fracción menor a 2.5 micras, se observa la contribución del sector industrial en la composición de la partícula y en la formación de contaminantes secundarios, con ello se proponen las siguientes medidas para este sector.

El objetivo de las medidas de mitigación es y deberá ser la mejora de la salud poblacional, para ello se propone declarar Zonas críticas o zonas saturadas como se explica en la Tabla 19 para generar planes de descontaminación, cuya finalidad será recuperar los niveles señalados en las normas de calidad de aire.

Tabla 19 Medidas propuestas para Fuentes Fijas

Medida	Descripción y antecedentes
Reubicar a la industria pesada altamente contaminante.	Este programa consistirá en lo siguiente: - Aquella industria que no sea posible reubicar en el corto y mediano plazos, y que presente altas emisiones, debe instalar de manera obligatoria tecnologías modernas anticontaminantes y utilizar combustibles más limpios, como es el gas natural en sustitución del combustóleo y otros hidrocarburos pesados
Desarrollo de un programa industrial bajo en emisiones.	Este programa debe incluir varios puntos a cubrir por el sector industrial, como son; - Sustitución de combustibles (Debe prohibirse de manera progresiva pero inmediata, el uso de combustóleo en toda el AMM, como se ha hecho ya en otras zonas metropolitanas del país, de forma que se reduzcan significativamente las emisiones de $PM_{2.5}$ y SO_2, priorizando así la salud de la población)

	- Revisión, optimización e implementación de los sistemas de control de emisiones - Reducción de emisiones y modernización vehicular en la cadena de abastecimiento y suministro de mercancías, bienes y servicios.
Crear un Sistema de Monitoreo Continuo de emisiones en fuentes fijas además de la Red de Monitoreo ya existente.	- Se recomienda que todas las fuentes fijas cuenten con equipo para determinar la concentración de uno o varios contaminantes en una matriz de manera continua. - Que se reporten los datos de forma continua para fortalecer la Red de Monitoreo y realizar más estudios de Calidad del Aire en la región, así como mantener los límites permitidos y comparar con los datos reportados anualmente por las Fuentes Fijas en las Cedulas de Operación Anual (COA). - Con esta medida se conocerán los contaminantes emitidos por industria de forma temporal, lo que ayudará a los programas y planes de reducción a actuar en caso de altas concentraciones de contaminantes.
Identificación de zonas críticas de concentración de contaminantes	- Realizar análisis de meteorología y topografía en el AMM en las zonas expuestas a altas concentraciones de material particulado, y las condiciones a las cuales probablemente se generará una mala dispersión de contaminantes.
Colocar nuevas o reubicar estaciones de monitoreo para la mejor representatividad de zonas expuestas a concentraciones peligrosas de material particulado.	- Reubicar o colocar nuevas estaciones de monitoreo fijas, que sean representativas de la población, de los patrones de viento y de los niveles de contaminantes medidos para poder decretar emergencias.

	- Que sea requisito para declarar zonas críticas que se cuente con estaciones de monitoreo representativas dentro de la Zona.
Incentivos y medidas emergentes	- Incentivar a las posibles fuentes para que cuenten con programas para actuar en caso de emergencia y que no se vea afectada la productividad en la región. - Incentivos para la adquisición de nuevas tecnologías de proceso y de control de emisiones. - Reducción de impuestos a industrias que adopten tecnologías o medidas encaminadas a la reducción de sus emisiones de partículas. - Creación de un certificado de “Industria libre de partículas” que conlleve a beneficios gubernamentales para la industria o que sus productos cuenten con dicha leyenda al encontrarse en venta y que los consumidores comprometidos con el medio ambiente puedan decidir comprar más el producto elaborado en dicha industria.
Reducción de emisiones de $PM_{2.5}$ a partir de la instalación de quemadores modernos en la industria de producción de petróleo y gas	- Esta es una medida que ha sido implementada exitosamente en países como Noruega y Estados Unidos, Esta medida ha sido identificada como una de las medidas de mayor efectividad en México como medida para la reducción de emisiones de carbono negro (UNEP, 2016)
Proponer metas de emisión a grandes industrias con altas emisiones.	- Metas de alcanzar reducciones de un 30%, 50% por ciento en determinado tiempo a grandes establecimientos.
Promover la creación de una nueva Norma de Calidad del Aire para $PM_{2.5}$ en el AMM, y	- Proponer los límites en los que se decretará Zona Critica, delimitando por Zonas el área afectada en base a la población expuesta, y

en la cual se especifiquen las condiciones y límites para declarar una Zona Saturada o Crítica para tomar medidas emergentes ante altas concentraciones de contaminantes[1]. 1. Medida que ha sido implementada en California desde el 2005 (CEPA, 2004). En Chile, esta medida forma parte del programa de Descontaminación del Aire (MMA, 2015).	el tamaño o cantidad de industrias en la misma, para dar prioridad en caso de que se declare una situación de alta exposición de contaminantes. - Integrar un informe técnico para declarar Zona Saturada o Crítica, basado en análisis de datos históricos de la Red de Monitoreo y en análisis de la meteorología por temporadas del año, con el fin de prevenir la alta emisión de contaminantes en estas fechas y reducir la concentración de contaminantes en la atmósfera. - Proponer los criterios para declarar Zona Saturada, para evitar el asentamiento de nuevas industrias dentro de zonas ya saturadas e implementar medidas en otras fuentes principalmente móviles para mejorar movilidad en estas zonas.
	-

12.2 Medidas propuestas aplicables Fuentes de Área

A continuación, en la Tabla 23 se mencionan algunas medidas de control para Fuentes de Área

Tabla 20 Medidas propuestas para Fuentes de área

Medida de control	Descripción-Observación
Gestión integral para la reducción de emisiones	- Generar programa que involucre a los principales emisores de área como canteras, industrias de la construcción y vialidades. - Instalación de sistemas de control en la distribución de combustibles. - Se recomienda una visión de clústeres que abarque buenas prácticas en las diferentes actividades del sector: beneficio de materiales, transporte, desarrollo de obras y disposición de residuos
Evitar asfaltado y pavimentación de caminos en meses de la temporada seca-fría	- Dado que los COVs, son precursores de $PM_{2.5}$, se debe evitar las actividades de asfaltado y pavimentación, durante los meses de época seca-fría, que es en las que más se presentan problemas de calidad del aire en el AMM.
Controlar las emisiones fugitivas de COV´s mejorando prácticas en el manejo y distribución de Gas LP	- Se conoce de las emisiones de COV´s generadas por el manejo y distribución de Gas LP, por lo que es necesario mejorar la tecnología e infraestructura para reducir emisiones fugitivas de este gas y reducir con ello la formación de partículas secundarias y la formación de ozono.
Controlar las emisiones fugitivas de COV´s mejorando prácticas en el manejo, almacenamiento y distribución de gasolina y diésel.	- Se propone controlas las emisiones de COV´s generadas por el manejo, almacenamiento y distribución de gasolina y diésel en la región, por lo que es necesario mejorar la tecnología e infraestructura desde las centrales de abastecimiento, los tanques o cisternas de almacenamiento hasta las bombas y

Medida de control	Descripción-Observación
	pistolas expendedoras del combustible, para reducir emisiones fugitivas de este gas.
Controlar las emisiones de COV´s derivados de la utilización de pinturas, recubrimientos solventes y limpiadores de uso industrial y doméstico.	- Se deben aplicar normas similares a las que están en desarrollo en otras ciudades del país para reducir el contenido de COVs en pinturas, recubrimientos, solventes y limpiadores de uso doméstico e industrial

12.3 Medidas propuestas aplicables Fuentes Móviles

Con la finalidad de obtener una mejor calidad del aire y en consecuencia una mejor calidad de vida en el AMM es fundamental y urgente desarrollar políticas públicas para un transporte integral para las zonas urbanas e industriales que existen en la región, donde se incluya el desarrollo de infraestructura para migrar a un sistema de transporte público de alta capacidad, eficiente y limpio.

Estas medidas generaran a su vez una reducción del número de autos particulares que existen ya en circulación, la mejoría de tecnologías de los vehículos y de calidad de combustibles para ello será necesario que se promueva el uso el transporte no motorizado (como andar a pie y en bicicleta), para lo que se requiere de banquetas óptimas para esta labor y ciclovías que garanticen la seguridad de los peatones y ciclistas, a continuación se presentan medidas propuestas para las fuentes móviles en el AMM. (Ver Tabla 24)

Tabla 21 Medidas propuestas para Fuentes Móviles

Medida de control	Descripción-Observación
Actualizar las tecnologías vehiculares y sustituir vehículos a diésel por combustibles más limpios como el gas natural y eléctricos	- La introducción de tecnologías vehiculares como son vehículos de carga y de transporte público a diésel que cumplan al menos con los estándares de emisión Euro VI o equivalente, representa las mayores oportunidades de reducción de NOx, COVs y $PM_{2.5}$ primarias. - La sustitución de combustibles como gasolina y diésel a combustibles de

Medida de control	Descripción-Observación
	gas natural y eléctricos en vehículos de transporte público traerían reducciones importantes en las emisiones de $PM_{2.5}$ - Gestionar con PEMEX la necesidad de disponer de combustibles fósiles de ultra bajo azufre y con formulaciones ad-hoc funcionales para las distintas condiciones meteorológicas específicas que se presentan en el AMM
Retirar o limitar la circulación a vehículos a diésel ostensiblemente contaminantes priorizando aquellas zonas de alta densidad poblacional y que hayan sido declaradas como Zonas críticas.	- Esta medida ya forma parte de un programa implementado desde hace algunos años en la ZMVM por parte de patrullas ecológicas. - El uso de sensores remotos ha sido propuesto para auxiliar en la implementación de esta medida. El uso de tecnologías de sensor remoto para sanción a vehículos permitirá un control riguroso sobre aquellos vehículos altamente contaminantes.
Disminuir el índice de motorización	- Promover el uso integral del transporte público de forma que se reduzca el índice de motorización, el cual en algunos municipios es el más alto del país

Medida de control	Descripción-Observación
Implementar un esquema de incentivos para fortalecer el programa de chatarrización de vehículos pesados obsoletos, y evitar la importación de vehículos y refacciones usados que no cuenten con tecnología para reducir emisiones	- Chatarrización de unidades de transporte de carga y pasajeros que tenga una antigüedad mayor a 20 años, como primera etapa, acoplado medidas relacionadas a beneficios fiscales para maximizar la sustitución.
Acelerar la implementación de zonas de restricción vehicular/ ecozonas o zonas de baja emisión.	- A partir de estudios previos, se han identificado áreas en los que la implementación de estas zonas en México traería beneficios importantes en la salud de población que vive, trabaja, estudia o transita en estas zonas (CMM, 2014b, 2016). - Esta medida ha sido aplicada exitosamente en países como Alemania (Berlín) e Italia (Milán) denominando a estas zonas con el nombre de LEZ que son áreas urbanas con problemas de calidad de aires causados por alto tráfico.
Incorporar la verificación físico-mecánica de los vehículos y transportes particulares.	- Medida propuesta por el CMM (CMM, 2014ª, 2016) utilizada como una herramienta para la verificación de las emisiones de vehículos en circulación. - Con ello se obliga a los propietarios de transporte público a modernizar su flota vehicular o instalar tecnología para control de emisiones.
Rediseño de redes viales y movilidad sostenible	- Movilidad: Optimización y rediseño de las redes de transporte metropolitano, de tal modo que no

Medida de control	Descripción-Observación
	haya líneas obsoletas generando emisiones en el AMM. - Reordenación de paradas de transporte público y flujos vehiculares, regulación de la circulación de los vehículos de carga, fomento al uso del transporte escolar el transporte de personal empresarial, promover el uso de la bicicleta y regulación de vehículos publicitarios. - Se propone que se realicen con frecuencia campañas sobre el uso de la bicicleta, las caminatas, la eficiencia energética y financiera y el uso de los medios de transporte públicos - Las medidas aplicables a fuentes móviles deben implementarse de manera conjunta con estrategias de movilidad sostenible empresarial de forma que se reduzca la demanda
Proponer incentivos para el uso de bicicletas y ciclo vías confiables y seguras.	- Incentivos a Bicicletas y Ciclovías**:** Construcción de una amplia ciclo-ruta, que conecte toda la ciudad y que se coloquen bici estacionamientos públicos.

12.4 Otras medidas

Es importante mencionar otras medidas de control que pueden ser implementadas en el Área Metropolitana de Monterrey y que no se basan directamente sobre una fuente de emisión, las cuales se muestran en la siguiente Tabla 22

Tabla 22 Otras medidas

Medida de control	Descripción- Observación
Liderazgo industrial	o Aprovechar el liderazgo industrial de la región para gestionar un Pacto por la Calidad del Aire con las industrias, que permita la implementación de medidas de reducción de emisiones y la modernización industrial.
Salud Ambiental	- Desarrollo de un sistema para el trabajo conjunto del sector salud y ambiente para el monitoreo y valoración periódica de los impactos de la contaminación del aire en la AMM
Monitoreo	- Fortalecimiento del programa de control y aseguramiento de la calidad de los datos del monitoreo. - Desarrollo de una estrategia integral de comunicación que incluya publicación de la información de la calidad del aire en tiempo real y accesible a la población.
Promover la participación social en la vigilancia de la calidad del aire.	- La participación de grupos ciudadanos como contraparte "auditora" del progreso, y la posible vinculación a campañas globales por el aire limpio, como lo han hecho ya otras zonas metropolitanas del país, como por ejemplo la campaña Breathlife
Inventarios de Emisión	- Fortalecimiento de la gestión de inventarios de emisiones incluyendo: a) actualización periódica y b) desarrollar inventarios de emisiones útiles para modelación de química atmosférica y estudios de calidad del aire.
Implementar planes de horario escalar empresarial e industrial.	- Estrategias en estratificar los horarios de entrada y salida de las Industrias, incluyendo estrategias como: a) Home office en trabajo administrativo; b) Nuevas rutas

	empresariales de transporte público (De terminales de metro o ecovía directamente a la industria o lugar de trabajo), y c) auto compartido
Informar a los ciudadanos sobre la calidad del aire en tiempo real	- Crear una plataforma para que la población se encuentre enterada de las concentraciones de contaminantes, y de las industrias que ya cuentan con políticas para disminuir la contaminación atmosférica. - Es obligación informar a la población sobre la calidad del aire en la región, y en tiempo real.
Implementar sistemas de pronóstico de calidad del aire incluyendo predicción eventos de altas concentraciones de $PM_{2.5}$	- A través del pronóstico de calidad del aire se pueden predecir eventos de altas concentraciones atmosféricas, para que la población pueda tomar medidas preventivas que no afecten drásticamente las actividades de la población.

13. Conclusiones

Algunos de los factores más importantes para que se propicie una buena o mala calidad del aire, no solo radica en el control de sus emisiones, sino también en la meteorología y topografía del sitio, por lo que, en el caso del AMM, se comprobó mediante ejercicios de modelación y análisis de datos históricos de dirección en intensidad de viento, que la dirección predominante en la que se desplaza el aire, va del sector Este y Sureste hacia el Noroeste, por lo que los municipios ubicados en ese sector (municipio de García) serán buena parte del año sitios receptores de parcelas de aire cargadas de contaminantes atmosféricos, que se emiten desde el Este y Sureste de Monterrey (municipio de Cadereyta y Pesquería), en donde se ubica una refinería de petróleo y una Central Termoeléctrica de Ciclo Combinado, mismas que tienen una fuerte contribución en los niveles de $PM_{2.5}$ y precursores, que se registran en el Centro y Noroeste de la AMM. Por lo que las parcelas de aire que pasan por esta zona, acumulan emisiones de contaminantes y al ser transportados, siguen su paso por la zona central de la AMM en donde se cargan de nuevo de contaminantes debido a las fuentes móviles que ahí circulan;

adicionalmente a las fuentes fijas que operan en el centro de Monterrey. De esta manera, las parcelas de aire continúan su trayectoria hacia municipios del Oeste y Noreste de la AMM donde usualmente se registran los niveles más altos de PM_{10} y $PM_{2.5}$ debido a en primer lugar a la actividad que ahí se desarrolla (pedreras), más el acarreo de contaminantes que provienen de las regiones antes señaladas.

Derivado del análisis histórico de los datos de calidad del aire, se observó que en la época fría-seca (diciembre-febrero) se registran los periodos con mayor concentración de $PM_{2.5}$, cuya causa está asociada a la disminución de la altura de la capa de mezcla.

Un hallazgo importante derivado de este trabajo y que debe llamar la atención de la autoridad ambiental para tomar medidas correctivas y preventivas urgentes, se basa en el hecho que de los cinco días que se tomaron muestras de $PM_{2.5}$, dos de estos presentaron excedencias a los niveles máximos permisibles de concentración de esta especie (> 45 $\mu g/m^3$) tanto en García como en San Juan, considerando que desde el punto de vista meteorológico, el mes de junio corresponde a eventos de estabilidad atmosférica débiles o nulos, lo que hace suponer que en temporada fría-seca los niveles de los contaminantes aumentarán significativamente.

Con respecto a la especiación de $PM_{2.5}$, se encontró que en los tres sitios fijos, el porcentaje de especies cuantificadas osciló entre 31 y 45% del total de la masa colectada como $PM_{2.5}$; siendo García el sitio con una mayor fracción de especies identificadas como precursores de aerosoles inorgánicos secundarios asociados a sulfatos y nitratos (aproximadamente 15.97%. de la masa total de $PM_{2.5}$ colectada); mientras que en San Juan, los sulfatos y nitratos se estimaron alrededor de 12.5%. En Universidad las especies que predominaron fueron asociadas a origen geológico (Al, Si, Ca, Fe) con un porcentaje de 24.8% con respecto a la masa total de $PM_{2.5}$ que están asociada con giros industriales dedicados a la producción de cemento y vidrio, ya que el sitio Universidad se ubica en el centro de Monterrey. Adicionalmente se identificó una fuerte correlación entre los iones sulfato y amonio en el sitio García y San Juan que se asocia a la presencia de sales de sulfato de amonio que son utilizados en la zona como fertilizantes agrícolas.

En términos de carbono orgánico, con base en los resultados de una muestra de 24 horas, se obtuvo que el 100% de la muestra de $PM_{2.5}$ colectada en San Juan correspondió a carbono orgánico (OC) mostrando que en ese sitio hay fuentes importantes que llevan a cabo la quema de combustibles fósiles, lo cual concuerda con los procesos industriales de refinación de petróleo y generación de energía eléctrica que ocurren en esa zona. Por su parte, en García la fracción de OC correspondió a 85% de la masa de $PM_{2.5}$, mostrando que también existen en el lugar industrias como las pedreras que queman combustibles fósiles.

Con relación al análisis histórico de datos de calidad del aire, se encontraron deficiencias en la operación de estas, ya que el registro de la información de $PM_{2.5}$ no se realizan en todas las estaciones de la red y aquellas que lo realizan no cumplen con el 75% de suficiencia de datos para realizar análisis estadísticamente representativos. Sin embargo, analizando aquellas estaciones que cumplían con al menos el 40% de suficiencia de datos, se observó que hay excedencias a las normas de calidad del aire para $PM_{2.5,}$ PM_{10} y O_3. Los contaminantes como SO_2 y NO_2 no presentaron excedencia para el año 2016. Se encontró también que la Red de monitoreo de Monterrey, no cuenta con estaciones representativas de actividad vehicular que permitan conocer el impacto de la calidad del aire debido a esta fuente, por lo que se recomienda que de acuerdo con las recomendaciones de la USEPA se cuente con al menos dos sitios de monitoreo para este fin. En cuanto al análisis de $PM_{2.5}$ para datos históricos de las estaciones, se observó que las estaciones que presentan los niveles más altos de esta especie son aquellos ubicados al Noroeste (San Bernabé) y en algunos casos al Noreste (Apodaca y San Nicolás), presentando picos durante la noche que se asocian a la actividad de la refinería en Cadereyta.

Los gráficos polares de $PM_{2.5}$ mostraron posibles fuentes, asociados a cada una de las siguientes estaciones, en el caso de San Pedro (SW2) las emisiones mostraron proveniencia del Noroeste; para San Nicolás (NE) se identificaron fuentes muy cercanas al sitio de medición, que coincide con la presencia de industria de la celulosa/papel e industria química; en el caso de San Bernabé (NW) se identificaron fuentes locales con cercanía al oeste y alguna fuente importante proveniente del Sur-Sureste; así como en Apodaca (NE2) se observaron influencias de fuentes ubicadas al Noreste y Este.

En términos de los resultados obtenidos a partir del transporte público, se observó de manera general que las concentraciones más altas de $PM_{2.5}$ ocurrieron en la Línea 2 del Metro (Metrorrey) durante los recorridos matutinos, encontrando promedios que oscilaron entre los 19 y 25 $\mu g/m^3$ teniendo picos entre 67-76 $\mu g/m^3$ al aproximarse a la estación “Niños Héroes” que coincide con la cercanía de dos fuentes fijas importantes. Para el caso de la Ecovía las concentraciones máximas también ocurrieron durante la mañana con concentraciones promedio oscilando entre los 22 y 34 $\mu g/m^3$ y presentando máximos supriores a las 66 $\mu g/m^3$ cuando el transporte pasaba cerca de parques industriales.

Considerando todo lo anterior es urgente fortalecer la infraestructura de monitoreo de la calidad del aire no solo para gases contaminantes, sino también para material particulado PM_{10} y sobre todo $PM_{2.5}$, que permita aportar información valiosa para la toma de decisiones, o bien para contar con evidencias que respalden la aplicación

de políticas encaminadas a la regulación de giros industriales a nivel local y federal, siendo más estrictos para que impacten de manera directa en una buena calidad del aire. Aunado a lo anterior existe la necesidad imperiosa de realizar estudios más profundos y detallados de la composición e identificación de fuentes principales.

De manera complementaria se reitera la urgente necesidad de llevar a cabo acciones que eviten la exposición de la población a niveles peligrosos de contaminantes atmosféricos, ya que aún se desconoce muchos temas relacionados con las fuentes de emisión, la dinámica, el transporte, y la fotoquímica de la atmosfera del AMM. Sugiriendo la ejecución de campañas más extensas y más instrumentadas para tener un mejor entendimiento de los fenómenos atmosféricos en escalas locales y regionales, permitiendo definir cuencas atmosféricas que compartan no solo sus emisiones, sino también sus políticas de prevención y control de la contaminación atmosférica y contaminantes climáticos.

Se identificó también la necesidad de implementar estrategias eficaces de movilidad sustentable para mejorar la infraestructura de transporte público en términos de cobertura espacial con una gran capacidad de transporte de personal para reemplazar y “deschatarrizar” la flota vehicular que circula en el AMM promoviéndolo con incentivos fiscales, y paralelamente promover el uso de combustibles limpios que disminuyan la emisión de $PM_{2.5}$ primarias y sus precursores.

También se recomienda mantener en buenas condiciones la infraestructura para medir $PM_{2.5}$ y promover la adquisición de más equipos que registren este parámetro y lo acoplen a instrumentos que midan carbono negro, para que entre otros temas se disminuya la incertidumbre de los inventarios de emisión.

Debe prohibirse de manera progresiva pero inmediata, el uso de combustóleo en toda el AMM, como se ha hecho ya en otras zonas metropolitanas del país, de forma que se reduzcan significativamente las emisiones de $PM_{2.5}$ y SO_2, priorizando así la salud de la población. Y es conveniente aprovechar el liderazgo industrial de la región para gestionar un Pacto por la Calidad del Aire con las industrias, que permita la implementación de medidas de reducción de emisiones y la modernización industrial

En el caso de las fuentes móviles es necesaria la introducción de tecnologías vehiculares como son vehículos de carga y de transporte público a diésel que cumplan al menos con los estándares de emisión Euro VI o equivalente, ya que representan las mayores oportunidades de reducción de NOx, COVs y $PM_{2.5}$ primarias. Lo anterior debe acoplarse para promover el uso integral del transporte público de forma para reducir el índice de motorización, el cual en algunos municipios es el más alto del país.

Se debe incentivar la chatarrización de unidades de transporte de carga y pasajeros que tenga una antigüedad mayor a 20 años, como primera etapa, y se recomienda acoplarla con beneficios fiscales para maximizar la sustitución.

Se recomienda gestionar la disponibilidad de combustibles de ultra bajo azufre y con formulaciones adecuadas y funcionales para las distintas condiciones meteorológicas específicas que se presentan en el AMM.

Las medidas aplicables a fuentes móviles deben implementarse de manera conjunta con estrategias de movilidad sostenible empresarial de forma que se reduzca la demanda.

En el caso de las fuentes de área, haciendo énfasis al sector construcción, se recomienda adoptar una visión de clústeres que abarque buenas prácticas en las diferentes actividades del sector: beneficio de materiales, transporte, desarrollo de obras y disposición de residuos.

De esta manera se recomienda avanzar de manera inmediata y urgente con la implementación de las medidas recomendadas, para evitar el crecimiento de emisiones que se tiene proyectado hacia futuro en el caso de que no se implementen las mismas con celeridad.

Adicionalmente es recomendable fomentar la participación de grupos ciudadanos como contraparte “auditora” del progreso, y la posible vinculación a campañas globales por el aire limpio, como lo han hecho ya otras zonas metropolitanas del país, como por ejemplo la campaña Breathlife.

14. Bibliografía

Centro Mario Molina. (CMM) (2018). Propuestas para el desarrollo sustentable de una ciudad mexicana (Monterrey). Disponible en:

Fajersztajn, L., Veras, M., Barrozo, L. V., & Saldiva, P. (2013). Air pollution: a potentially modifiable risk factor for lung cancer. Nature Reviews Cancer, 13(9), 674–678. doi:10.1038/nrc3572

Gray, K. & Finster, M. (2000). The Urban Heat Island, Photochemical Smog, and Chicago: Local Features of the Problem and Solution

Guxens, M., Lubczyńska, M. J., Muetzel, R. L., Dalmau-Bueno, A., Jaddoe, V. W. V., Hoek, G., El Marroun, H. (2018). Air Pollution Exposure During Fetal Life, Brain Morphology, and Cognitive Function in School-Age Children. Biological Psychiatry, 84(4), 295–303. doi:10.1016/j.biopsych.2018.01.016

Heft-Neal, S., Burney, J., Bendavid, E., & Burke, M. (2018). Robust relationship between air quality and infant mortality in Africa. Nature, 559(7713), 254–258. doi:10.1038/s41586-018-0263-3

INEGI (2015). Instituto Nacional de Estadística y Geografía, “Panorama sociodemográfico de Nuevo León, Encuesta Intercensal 2015”. Disponible en http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825082291. Consultado el 24 de septiembre de 2018.

INEGI (2015). Instituto Nacional de Estadística y Geografía, “Panorama sociodemográfico de Nuevo León, Encuesta Intercensal 2015”. Disponible en http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825082291. Consultado el 24 de septiembre de 2018.

INSP. (2012). Encuesta Nacional de Salud y Nutrición. Resultados por Entdiad Federativa. Nuevo León. Instituto Nacional de Salud Pública. Obtenido de https://ensanut.insp.mx/informes/NuevoLeon-OCT.pdf

Jáuregui, E. (1997). Heat island development in Mexico City. Atmos. Environ., 31, 3821–3831.

Jáuregui, E.; Luyando, E. (1999). Global radiation attenuation by air pollution and its effects on the thermal climate in Mexico City International Journal of Climatology, 19(6), 683-694.

Killian, J., Kitazawa, M. (2018). The emerging risk of exposure to air pollution on cognitive decline and Alzheimer's disease e Evidence from epidemiological and animal studies. Biomedical Journal. 141-162

Lin, Y. et al. The impacts of air pollution on maternal stress during pregnancy. Sci. Rep. 7, 40956; doi: 10.1038/srep40956 (2017).

Mancilla, Y.; et al. (2014). Secondary organic aerosol contributions to PM2.5 in Monterrey, Mexico: Temporal and seasonal variation. Atmospheric Research. 348-359

Martinez A, et al. (2012). Chemical Characterization and Factor Analysis of PM2.5 in Two Sites of Monterrey, Mexico. Journal of the Air and Waste Management Association. 62:7, 817-827

Mian Chin Daniel J. Jacob J. William Munger David D. Parrish Bruce G. Doddridge (1994); “Relationship of ozone and carbon monoxide over North America” , Journal of Geophysical Research: Atmospheres; Vol. 99, Pages 14,565-14,573; https://doi.org/10.1029/94JD00907

O’Donovan, G., Chudasama, Y., Grocock, S., Leigh, R., Dalton, A. M., Gray, L. J., Wells, A. (2017). The association between air pollution and type 2 diabetes in a large cross-sectional study in Leicester: The CHAMPIONS Study. Environment International, 104, 41–47. doi:10.1016/j.envint.2017.03.027

OMS. (2005). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Ginebra: Organización Mundial de la Salud.

Parent, M.-É., Goldberg, M. S., Crouse, D. L., Ross, N. A., Chen, H., Valois, M.-F., & Liautaud, A. (2013). Traffic-related air pollution and prostate cancer risk: a case–control study in Montreal, Canada. Occupational and Environmental Medicine, 70(7), 511–518. doi:10.1136/oemed-2012-101211

Parrish M. Trainer D. Hereid E. J. Williams K. J. Olszyna R. A. Harley J. F. Meagher F. C. Fehsenfeld; (2002); “Decadal change in carbon monoxide to nitrogen oxide ratio in U.S. vehicular emissions”; , Journal of Geophysical Research: Atmospheres; VOL. 107, NO. D12, 4140.

Platt, U. & Stutz J. (2008). Differential Optical Absortion Spectroscopy Principles and Applications. Springer

Platt, U., y J. Stutz (2008), Differential Optical Absorption Spectroscopy: Principles and Applications, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

ProAire Nuevo León. (2016). Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Estado de Nuevo León. ProAire 2016-2'15. Monterrey: Gobierno del Estado de Nuevo León. Secretaría de Desarrollo Sustentable.

Salgado U. Isaias. (1992). El análisis exploratorio de datos biológicos. Fundamentos y aplicaciones. Ediciones MARC y Escuela Nacional de Estudios Profesionales Zaragoza, UNAM. México.

Secretaría de Salud. (2015). Informe sobre la salud de los Mexicanos: Diagnóstico General de la Salud de la Población. México. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/64176/INFORME_LA_SALUD_DE_LOS_MEXICANOS_2015_S.pdf

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. Calidad del aire en la Ciudad de México, informe 2016 (2017). Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico. Ciudad de México.

SEDASU. (2016). Programa de gestión para mejorar la calidad del aire del estado de Nuevo León ProAire 2016 - 2025. Monterrey: Secretaría de Desarrollo Sustentable de Nuevo León.

SEDASU. (2017). Inaugura NL dos nuevas estaciones de monitoreo ambiental. Recuperado el 6 de Septiembre de 2018, de Boletín: http://www.nl.gob.mx/noticias/inaugura-nl-dos-nuevas-estaciones-de-monitoreo-ambiental

SEDASU. (2018). Inicia Estado operación de nuevos mecanismos de monitoreo ambiental. Recuperado el 6 de Septiembre de 2018, de Boletín: http://www.nl.gob.mx/noticias/inicia-estado-operacion-de-nuevos-mecanismos-de-monitoreo-ambiental

SIMA (2008). Programa de Gestión Para Mejorar la Calidad del Aire del Área Metropolitana de Monterrey 2008-2012

SIMA. (2018). Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA) Nuevo León. (Secretaría de Desarrollo Sustentable de Nuevo León) Recuperado el 6 de Septiembre de 2018, de Reporte de la calidad del aire en el área metropolitana de Monterrey: http://aire.nl.gob.mx/map_calidad.html

SINAICA. (2018). Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire. Recuperado el 6 de Septiembre de 2018, de Red de monitoreo: Monterrey (MTY): http://sinaica.inecc.gob.mx/

Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA, http://sinaica.inecc.gob.mx/

Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA, http://sinaica.inecc.gob.mx/

Statistica. 1997. Manual del Programa STATISTICA versión 5.

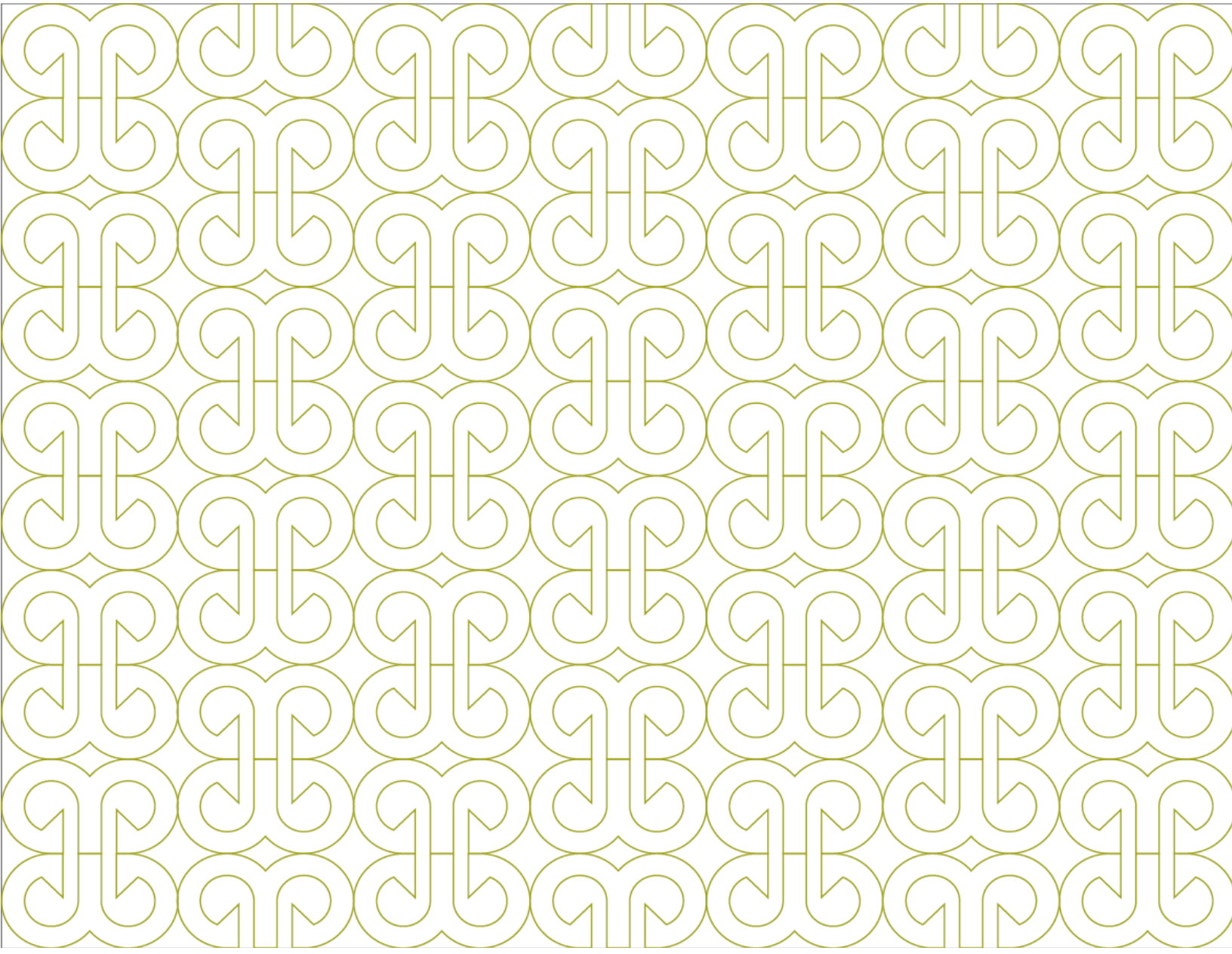
Torre, M; et al (2015). Diurnal and seasonal variation of volatile organic compounds in the atmosphere of Monterrey, Mexico. Atmospheric Pollution Research. 1073-1081.

Valavanidis A , Fiotakis K.A & Vlachogianni T., (2014), Airborne Particulate Matter and Human Health: Toxicological Assessment and Importance of Size and Composition of Particles for Oxidative Damage and Carcinogenic Mechanisms, Journal of Environmental Science and Health, Part C: Environmental Carcinogenesis and Ecotoxicology Reviews, 26:4, 339-362, DOI: 10.1080/10590500802494538

Vega, E., Reyes, E., Sanchez, G., Ortiz, E., Ruiz, M., Chow, J., Watson, J., Edgerton, S., (2002). Basic statistics of PM2.5 and PM10 in the atmosphere of Mexico City. Science of the Total Environment 287, 167-176.

Wei Y, Han I., Shao M., Hu M., Zhang J., and Tang X.; (2009), PM2.5 Constituents and Oxidative DNA Damage in Humans; Environmental Science & Technology 43 (13), 4757-4762 DOI: 10.1021/es803337c

WHO. (2013c). Review of Evidence on Health Aspects of Air Pollution-REVIHAAP Project. Disponible en http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2013/review-of-evidence-on-health-aspects-of-air-pollution-revihaap-project-final-technical-report

Yoshikado, H., & Tsuchida, M. (1996). High Levels of Winter Air Pollution under the Influence of the Urban Heat Island along the Shore of Tokyo Bay. Journal of Applied Meteorology, 35(10), 1804–1813. 10.1175/1520-0450(1996)035<1804:hlowap>2.0.co;2

Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos Sobre Energía y Medio Ambiente A.C.
Paseo de los Laureles No 458 Int. 406
Col. Bosques de las Lomas
C.P. 05120 Ciudad de México
T: (+55) 9177.1670 F: (+55) 9177.1690
www.centromariomolina.org
Twitter: @CentroMMolina
Facebook.com/CentroMarioMoli