

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA



**TECNOLOGICO  
DE MONTERREY®**

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE EMISIÓN DE  $PM_{2.5}$  PROVENIENTES  
DE FUENTES VEHICULARES A PARTIR DE MEDICIONES EN EL  
TÚNEL DE LA LOMA LARGA DEL ÁREA METROPOLITANA DE  
MONTERREY

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER  
EL GRADO ACADÉMICO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS  
ESPECIALIDAD EN SISTEMAS AMBIENTALES**

POR:  
YASMANY MANCILLA MÉNDEZ

MONTERREY, N.L.

DICIEMBRE 2009


INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY


DIVISIÓN DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la presente tesis presentada por Ing. Yasmany Mancilla Méndez sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado académico de Maestro en Ciencias con especialidad en Sistemas Ambientales.

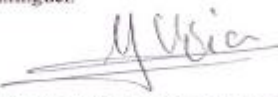
Comité de tesis:

  
Dr. Alberto Mendoza Domínguez

Asesor

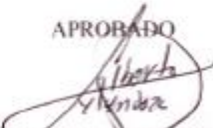
  
Dr. Porfirio Caballero Mata.

Sinodal

  
Dr. Gerardo Manuel Mejía Velázquez.

Sinodal

APROBADO

  
Dr. Alberto Mendoza Domínguez

Director del Programa de Maestría en Sistemas Ambientales

MONTERREY, N. L.

DICIEMBRE 2009

## **DEDICATORIA**

Este trabajo lo dedico con todo cariño a mi familia, quien me ha apoyado a lo largo toda mi trayectoria, que ha sido mi vida, y las personas que la integran son:

Mi padre Heriberto Mancilla Ramos, quién ha sido para mí un símbolo de trabajo y esfuerzo, que a pesar de las adversidades o problemas siempre ha sabido responder con el ejemplo laboral, símbolo para una buena educación.

Mi madre Victoria Méndez Hernández, que durante estos dos años me apoyo con sus consejos y su confianza en mí para poder terminar esta carrera que fue la maestría.

Mi hermano Heriberto Mancilla Méndez, a quien le agradezco inmensamente su apoyo durante la realización de este proyecto. Por haber compartido conmigo esta gran aventura que fue el Túnel de la Loma Larga.

Muchas gracias papá, mamá y hermano por haber estado en esta etapa de mi vida, en una de las mejores sin duda. Gracias.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por haber estado conmigo durante esta etapa de mi vida, por darme la confianza y seguridad de cumplir con mis metas. Gracias.

A mi asesor el Dr. Alberto Mendoza Domínguez, por haberme orientado durante la realización de este proyecto. Por haber compartido sus conocimientos, por haber sido un gran maestro en esta etapa de mi vida, por sus enseñanzas y comentarios que hicieron de mí un mejor profesionista. Por haberme dado una oportunidad de colaborar con él a través de la realización de este trabajo. Gracias.

A mis sinodales, el Dr. Gerardo Mejía Velázquez y Dr. Porfirio Caballero Mata, por su evaluación y comentarios, para el mejoramiento de este proyecto.

Al CONACYT por haber apoyado parcialmente la realización de este proyecto.

A la Cátedra de Investigación en Ingeniería de la Contaminación Atmosférica (CAT-186) por su apoyo en cuanto a recursos de infraestructura complementarios.

A un colega y gran amigo, Marco Antonio Martínez Cinco, por haber sido un gran maestro para mí, por sus consejos y enseñanzas, que sin duda fueron esenciales para mi formación como ingeniero ambiental. Por haberme apoyado durante esta etapa de mi vida, tanto profesional como personalmente. Gracias.

A una gran amiga y compañera, Ana Yael Vanoye García, por sus consejos y asesorías que me orientaron en la realización del escrito de esta Tesis. Gracias.

A la Sra. María del Rosario Covarrubias por su apoyo en la realización de los trámites necesarios para la realización de este proyecto.

A mi compañero de proyecto Eliud Araizaga y a todos sus allegados que ayudaron durante los monitoreos. A todas las personas, que de alguna forma, ayudaron y colaboraron a la realización de este proyecto.

Y finalmente a todos mis amigos y compañeros que estuvieron conmigo durante esta etapa de mi vida. A todos ustedes que fui conociendo a lo largo de esta etapa y sin darme cuenta se convirtieron en grandes amigos para mí, a ustedes a quien aprecio mucho, gracias por su apoyo, por haberme escuchado y sobre todo por haber convivido conmigo durante este lapso tan importante de mi vida y que espero siga así. Gracias.

## RESUMEN

El AMM, como toda zona urbana, es víctima de problemas de contaminación del aire en donde las fuentes móviles son uno de los principales contribuyentes. En este estudio se determinaron factores de emisión de fuentes móviles, bajo condiciones reales de manejo, de  $PM_{2.5}$  para 38 metales (Na al Pb), cationes ( $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $NH_4^+$ ), aniones ( $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ), carbón orgánico (OC) y carbón elemental (EC). Además, se estimaron perfiles químicos de emisión y factores de emisión de  $CO_2$ .

Este trabajo utilizó como sitio experimental el Túnel de la Loma Larga, donde se caracterizaron las emisiones de vehículos a gasolina de trabajo ligero (97%). Se colocaron dos puntos de muestreo, representando la entrada y salida del túnel. En estos puntos se determinaron las concentraciones de  $PM_{2.5}$ , utilizando muestreadores de bajo volumen, y  $CO_2$ , utilizando equipos de medición en tiempo real. El cálculo de factores de emisión se basó en un balance de materia entre la entrada y salida de cada tubo del túnel, considerando la diferencia entre ambos puntos como la masa emitida por fuentes móviles. En este trabajo se muestreó una flota de 108,569 vehículos con velocidades promedio entre 43 y 76 km/hr. Se obtuvieron factores de emisión promedio de  $17.5 \pm 5.7$  mg-veh<sup>-1</sup>km<sup>-1</sup> y  $145 \pm 94$  mg-L<sup>-1</sup> para  $PM_{2.5}$  y para  $CO_2$  de  $152 \pm 22$  y  $188 \pm 22$  mg-veh<sup>-1</sup>km<sup>-1</sup> y entre  $2,012 \pm 20$  y  $2,045 \pm 219$  g-L<sup>-1</sup>. Estos factores de emisión fueron corregidos por el efecto de resuspensión de polvos. Se consideró el efecto de la pendiente el cual fue mayor para las emisiones *pendiente arriba* que para las emisiones *pendiente abajo*. Las emisiones de fuentes vehiculares están dominadas principalmente por OC y EC. La proporción OC/EC fue de  $2.85 \pm 0.79$  y  $1.19 \pm 0.65$  para tráfico alto y moderado, respectivamente. La contribución de OC y EC, a la masa total emitida, fue de  $55 \pm 2.8\%$  y  $16.3 \pm 1.6\%$ , respectivamente.

En este estudio se determinó que los vehículos muestreados presentaron un rendimiento de 10.7 km/L. Los factores de emisión obtenidos fueron coherentes con los generados por el MOBILE6.2 México en 2005. Las emisiones de  $PM_{2.5}$ , obtenidas en este trabajo, fueron entre dos y cinco veces menores que las estimadas en otros estudios realizados en túneles.

# CONTENIDO

CAPÍTULO 1 .....	1
INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2 OBJETIVO GENERAL .....	3
1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
1.3 ALCANCES.....	4
1.4 JUSTIFICACIÓN .....	5
CAPÍTULO 2 .....	7
VÍNCULO ENTRE EMISIONES DE FUENTES MÓVILES Y PM <sub>2.5</sub> .....	7
2.1. EMISIONES DE FUENTES VEHICULARES .....	7
2.1.1 TÉCNICAS DE MEDICIÓN .....	7
2.1.2 DINAMÓMETRO VS TÚNEL.....	9
2.2 TÉCNICAS EN TÚNELES .....	11
2.2.1. <i>Caldecott Tunnel, San Francisco Bay Area, USA</i> (Allen <i>et al.</i> , 2001).....	11
2.2.2. <i>Shing Mung Tunnel, Hong Kong</i> (Cheng <i>et al.</i> , 2006). .....	13
2.2.3. <i>Woolloongabba Tunnel, Brisbane City, Australia</i> (Jamriska <i>et al.</i> , 2004). .....	13
2.3.4. <i>Sepulveda Tunnel, Los Angeles, California, USA</i> (Gillies <i>et al.</i> , 2001). .....	13
2.3.5. <i>Söderleds Tunnel, Stockholm, Sweden</i> (Kristensson <i>et al.</i> , 2004). .....	14
2.3.6. <i>Gubrist Tunnel, Zürich, Switzerland</i> (Weingartner <i>et al.</i> , 1997). .....	14
2.3.7. <i>Gelezinis Vilkas Tunnel, Vilnius, Lithuania</i> (Valiulis <i>et al.</i> , 2002). .....	14
2.3.8. <i>Fort McHenry y Tuscarora Mountain Tunnels, U.S.A.</i> (Pierson <i>et al.</i> , 1996). .....	15
2.3.9. <i>Kilborn Tunnel y Howell Tunnel, Milwaukee, U.S.A</i> (Lough <i>et al.</i> , 2005). .....	15
2.3 ESTUDIOS EN MÉXICO .....	17
CAPÍTULO 3 .....	20

METODOLOGÍA .....	20
3.1 MATERIALES Y EQUIPOS.....	20
3.1.1 Muestreador de aire .....	20
3.1.2 Filtros.....	22
3.1.3 Medidor de CO <sub>2</sub> .....	23
3.1.4 Anemómetro .....	24
3.2 EXPERIMENTACIÓN.....	24
3.2.1. Trabajo de campo .....	24
3.2.2. Descripción del sitio .....	25
3.2.2 Flujo Vehicular .....	27
3.2.3 Campaña de monitoreo.....	28
3.2.4 Blancos y polvos suspendidos .....	30
3.3 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA .....	31
3.4 ANÁLISIS QUÍMICOS .....	32
3.4.1 Gravimetría.....	32
3.4.2 Fluorescencia de Rayos X (XRF).....	33
3.4.3 Cromatografía de iones.....	33
3.4.4 Transmitancia Óptica Térmica .....	34
3.5. FACTORES DE EMISIÓN .....	34
3.5.1 Factores de emisión: distancia recorrida .....	34
3.5.2 Factores de emisión: combustible consumido .....	35
3.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	36
CAPÍTULO 4.....	37
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	37
4.1. TÚNEL.....	37
4.1.1. Flujo de aire.....	38



4.1.2. Aforo Vehicular .....	39
4.2. FACTORES DE EMISIÓN DE CO <sub>2</sub> .....	43
4.2.1. Factores de emisión: kilómetro recorrido. ....	43
4.2.2. Factores de emisión: combustible consumido. ....	48
4.2.3. Rendimiento vehicular.....	49
4.2.4. Efecto de la velocidad vehicular.....	49
4.2.5. Análisis Estadístico .....	50
4.3. EMISIONES DE PM <sub>2.5</sub> .....	52
4.4. CARACTERIZACIÓN DE PM <sub>2.5</sub> .....	56
4.4.1. Factores de emisión por especie. ....	56
4.4.2. Perfiles de emisión .....	63
4.5. CORRELACIÓN OC/EC.....	73
4.6. EMISIONES DEL AMM.....	76
CAPÍTULO 5 .....	79
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	79
5.1. CONCLUSIONES .....	79
5.2. RECOMENDACIONES .....	82
CAPÍTULO 6 .....	84
REFERENCIAS .....	84
ANEXOS 94	
A. Imágenes de los equipos utilizados en el Túnel de la Loma Larga. ....	94
B. Concentraciones de TNMHC y CO (Araizaga, 2009).....	98
C. Propiedades físicas registradas en el Túnel de la Loma Larga. ....	98
D. Descripción de Perfiles de Mexicali e Imperial County (Watson et al., 2001). ....	99
E. Resultados crudos enviados por ChesterLab. ....	100

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de FE para PM entre diferentes técnicas de medición. ....	10
Tabla 2. Parámetros relacionados con el control de contaminantes dentro de túneles (El-Fadel y Hashisho, 2001).....	12
Tabla 3. Comparación de Factores de emisión obtenidos en algunos estudios realizados en túneles. ....	17
Tabla 4. Tipos de filtros y sus características.....	22
Tabla 5. Especificaciones técnicas del multifuncional Testo 435.....	23
Tabla 6. Especificaciones técnicas del anemómetro de hilo caliente (Testo 425). ....	24
Tabla 7. Composición vehicular del 27 de junio del 2007 en el túnel de la Loma Larga. ....	27
Tabla 8. Programa del experimento. ....	29
Tabla 9. Muestreo de blancos para cada tubo. ....	30
Tabla 10. Velocidades de viento promedio de cada tubo del túnel de la Loma Larga.....	38
Tabla 11. Flujos Volumétricos de aire muestreados en cada tubo del Túnel de la Loma Larga. ....	38
Tabla 12. Cantidad total de vehículos muestreados durante cada muestreo. ....	41
Tabla 13. Factores de emisión de CO <sub>2</sub> por kilómetro recorrido.....	43
Tabla 14. Comparación de factores de emisión de CO <sub>2</sub> (g-veh <sup>-1</sup> -km <sup>-1</sup> ): efecto de la pendiente. ....	48
Tabla 15. Factores de emisión del CO <sub>2</sub> por combustible consumido.....	49
Tabla 16. Comparación de factores de emisión (g/L): efecto de la pendiente. ....	49
Tabla 17. Factores de emisión de PM <sub>2.5</sub> por kilómetro recorrido.....	52
Tabla 18. Factores de emisión de PM <sub>2.5</sub> por combustible consumido.....	52
Tabla 19. Factores de emisión promedio por kilómetro recorrido. ....	53
Tabla 20. Factores de emisión promedio por combustible consumido. ....	53
Tabla 21. Comparación de factores de emisión de PM <sub>2.5</sub> con otros estudios. ....	55
Tabla 22. Factores de emisión de PM <sub>2.5</sub> en mg-veh <sup>-1</sup> km <sup>-1</sup> (factores corregidos por blancos).....	57
Tabla 23. Factores de emisión de PM <sub>2.5</sub> en mg-L <sup>-1</sup> (factores corregidos por blancos). ....	58

Tabla 24. Factores de emisión de $PM_{2.5}$ en $mg\text{-veh}^{-1}\text{-km}^{-1}$ (factores corregidos por polvos).....	59
Tabla 25. Factores de emisión de $PM_{2.5}$ en $mg\text{-L}^{-1}$ (factores corregidos por polvos).....	60
Tabla 26. Factores de emisión promedio de $PM_{2.5}$ por especie química en $mg\text{-L}^{-1}$ .....	61
Tabla 27. Factores de emisión promedio de $PM_{2.5}$ por especie química en $mg\text{-veh}^{-1}\text{-km}^{-1}$ .....	62
Tabla 28. Descripción de los perfiles para fuentes móviles en el AMM. ....	63
Tabla 29. Perfiles de emisión de $PM_{2.5}$ para fuentes móviles del AMM (corregidos por blancos)...	69
Tabla 30. Perfiles de emisión de $PM_{2.5}$ para fuentes móviles del AMM (corregidos por polvos). ...	70
Tabla 31. Perfiles de emisión de fuentes móviles en Mexicali (México). ND = Valor no disponible. Perfiles obtenidos de Watson y Chow, 2001.....	71
Tabla 32. Perfiles de emisión de fuentes móviles en Imperial County (U.S.A.). ND = Valor no disponible. Perfiles obtenidos de Watson y Chow, 2001. ....	72
Tabla 33. Relación de OC y EC (Corregido por blancos).....	73
Tabla 34. Relación OC/EC (Corregido por polvos resuspendidos). ....	73
Tabla 35. Razones promedio OC/EC. ....	74
Tabla 36. Valores de las variables utilizadas en el cálculo de factores de emisión de fuentes móviles en el año 2005. ....	76
Tabla 37. Comparación de factores de emisión de fuentes móviles.....	77
Tabla 38. Factores de emisión de $CO_2$ para fuentes móviles del AMM (Hernandez, 2009). ....	78

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Muestreador de bajo volumen (MiniVol Air Sampler).....	21
Figura 2. Tipos de cabezal para muestreadores de bajo volumen. ....	21
Figura 3. Controles para programación y ajustes de un Muestreador de bajo volumen.....	21
Figura 4. Ubicación del Túnel de la Loma Larga. Principales avenidas cercanas al Túnel y zonas aledañas a la Loma Larga.....	25
Figura 5. Dimensiones de cada una de las entradas y salidas del Túnel de la Loma Larga. ....	26
Figura 6. Bosquejo descriptivo de las características del túnel de la Loma Larga, así como de la ubicación estimada de los equipos. ....	26
Figura 7. Aforo vehicular (vehículos/hora) en el túnel de la Loma Larga el día 27 de junio de 2007 (Villarreal, 2008). Sentido 1: norte a sur; sentido 2: sur a norte. ....	28
Figura 8. Cámara de resuspensión de polvos para muestreos instantáneos. ....	31
Figura 9. Composición vehicular del Túnel de la Loma Larga.....	40
Figura 10. Comparación de la composición vehicular del Túnel de la Loma Larga.....	41
Figura 11. Velocidad vehicular en el Túnel de la Loma Larga. ....	42
Figura 12. Concentraciones de CO <sub>2</sub> en el sentido 1 (Monterrey a San Pedro), durante una densidad de tráfico alto.....	44
Figura 13. Concentraciones de CO <sub>2</sub> en el sentido 1 (Monterrey a San Pedro), durante una densidad de tráfico moderado.....	45
Figura 14. Concentraciones de CO <sub>2</sub> en el sentido 2 (San Pedro a Monterrey), durante una densidad de tráfico alto.....	46
Figura 15. Concentraciones de CO <sub>2</sub> en el sentido 2 (San Pedro a Monterrey), durante una densidad de tráfico moderado.....	47
Figura 16. Influencia de la velocidad vehicular sobre los factores de emisión de CO <sub>2</sub> . ....	50
Figura 17. Concentraciones de PM <sub>2.5</sub> durante cada día de muestreo.....	53
Figura 18. Efecto de los polvos resuspendidos sobre los factores de emisión de PM <sub>2.5</sub> . El sentido 1 es pendiente arriba y el sentido 2 es pendiente abajo.....	54
Figura 19. Perfiles de emisión promedio de PM <sub>2.5</sub> en el sentido 1 (Corregidos por blancos).....	64
Figura 20. Perfiles de emisión promedio de PM <sub>2.5</sub> en el sentido 2 (Corregidos por blancos).....	64

Figura 21. Perfiles de emisión promedio de $PM_{2.5}$ en el sentido 1 (Corregidos por polvos resuspendidos).....	65
Figura 22. Perfiles de emisión promedio de $PM_{2.5}$ en el sentido 2 (Corregidos por polvos resuspendidos).....	65
Figura 23. Correlación entre OC y EC (Corregido por blancos).....	75
Figura 24. Correlación entre OC y EC (Corregido por polvos). ....	75

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. ANTECEDENTES

El deterioro de la calidad del aire en zonas urbanas ha contribuido al desarrollo de estrategias para el control de la contaminación del aire y emisiones de gases de efecto invernadero (Cadle *et al.*, 2008). Este deterioro representa un gran problema, para muchas ciudades del mundo, en cuanto a costos de las diferentes medidas de control para disminuir lasw emisiones de contaminantes a la atmósfera (West *et al.*, 2004). Los países en desarrollo con altos índices de actividades industriales, domésticas, comerciales y de servicio son los principales afectados por problemáticas de esta naturaleza. Tal es el caso de la Ciudad de México, que con cerca de 20 millones de habitantes, 3.5 millones de vehículos y 35,000 industrias tiene uno de los problemas más serios de contaminación del aire (McKinley *et al.*, 2005). Las emisiones provenientes de vehículos de motor, contribuyen de manera significativa a los inventarios de emisión de zonas urbanas (Cadle *et al.*, 2008). De acuerdo al último inventario realizado en el año 2000, para la ciudad de México, las emisiones de esta ciudad están dominadas por fuentes móviles: aproximadamente el 80% de las PM<sub>2.5</sub> y NO<sub>x</sub>, 45% de los compuestos orgánicos, 30% del de SO<sub>2</sub> y el 81 % del CO, provienen de fuentes móviles (McKinley *et al.*, 2005). De manera similar, el Área Metropolitana de Monterrey (AMM) no es la excepción, al presentar un constante crecimiento urbano que se mantiene en el presente y que la convierte en otra víctima de esta naturaleza. En México se ha realizado una variedad de estudios con el objeto de entender los diversos escenarios de deterioro ambiental que afectan al país, así como sus principales causas de origen. Estos estudios comprenden desde el monitoreo de la calidad del aire y sus impactos hasta la caracterización de emisiones (Bautista, 2007; Bravo y Torres, 2000; Vega *et al.*, 2000; Mugica *et al.*, 1998; Riveros *et al.*, 1998; West *et al.*,2004). Estas investigaciones muestran un panorama general de los problemas ambientales que se enfrentan en la actualidad, en nuestro país.

Dentro de las especies contaminantes de mayor importancia que se encuentran en la atmósfera, debido a sus efectos dañinos al ambiente, se pueden mencionar: Monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) denominados como NO<sub>x</sub>, partículas suspendidas con diámetro aerodinámico menor a 10 μm (PM<sub>10</sub>) y 2.5 μm (PM<sub>2.5</sub>), compuestos orgánicos volátiles (COVs) y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>). Los COVs y NO<sub>x</sub> son los principales precursores de la formación de ozono (O<sub>3</sub>) (Seinfeld y Pandis, 2006); el CO<sub>2</sub> es uno de los principales contribuyentes al calentamiento global; las partículas suspendidas son responsables de numerosos problemas respiratorios (Katsouyanni, 2003). A nivel internacional existen diversos estudios que se han realizado con el objeto de comprender mejor los impactos al medio ambiente que cada una de estas especies provocan. En México estos estudios no son suficientes y, si nos referimos al AMM, están limitados en cuanto a investigaciones de esta naturaleza a pesar de los problemas de deterioro de calidad ambiental existentes. De acuerdo al inventario de emisiones de 1999 (INE y SEMARNAT, 1999) se registraron  $9.654 \times 10^5$  Mg/año de PM<sub>2.5</sub>,  $2.443 \times 10^6$  Mg/año de NO<sub>x</sub>,  $2.004 \times 10^7$  Mg/año de COVs y  $7.494 \times 10^6$  Mg/año de CO en todo el país. De estas emisiones estimadas el 1.95% de PM<sub>2.5</sub>, 17.83% de NO<sub>x</sub>, 2.86% de COVs y 62.34% de CO proviene de fuentes vehiculares. Existen diversas fuentes generadoras de emisiones, sin embargo son las fuentes móviles, una de las fuentes primarias, que más aportan al deterioro de la calidad del aire (Schifter *et al.*, 2000). Para la Ciudad de Monterrey se han realizado estudios de modelación ambiental en los que se ha determinado que más del 60% de las emisiones son generadas por fuentes vehiculares (INE y SEMARNAT, 1999). A pesar de no ser el contaminante emitido en mayor cantidad, para este estudio son de principal interés las partículas suspendidas con diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 micrómetros (PM<sub>2.5</sub>), también conocidas como partículas finas. Se ha demostrado que estas partículas este contaminante, que proviene principalmente del consumo industrial de combustibles y de las emisiones de fuentes vehiculares (Gertler *et al.*, 2005), es responsable de diversos impactos a la salud (Brani *et al.*, 2009; Choi *et al.*, 2009; Gertler, 2005; Katsouyanni, 2003). En el inventario Nacional de Emisiones de México (INEM) realizado en 1999 se observa que el AMM y el resto del estado de Nuevo León contribuyen con  $1.563 \times 10^4$  Mg/año de PM<sub>2.5</sub>.

Para el diseño de estrategias de control de la contaminación atmosférica en el AMM, la Subsecretaría de Ecología inició en 1992 el proyecto SIMA (Sistema Integral de Monitoreo Ambiental). Este proyecto inició con la finalidad de contar con registro continuo y confiable de los niveles de contaminación ambiental en el AMM. Las estaciones del SIMA monitorean diariamente los niveles de CO, O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, éstas últimas a partir del 2003.

## **1.2 OBJETIVO GENERAL**

El objetivo general de este trabajo consiste en realizar un estudio en el Área Metropolitana de Monterrey con la finalidad de estimar perfiles químicos y factores de emisión de PM<sub>2.5</sub> emitidas por fuentes vehiculares, a partir de mediciones en el Túnel de La Loma Larga.

### **1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Dentro de los objetivos específicos considerados para llevar a cabo este estudio se encuentran:

1. Estimar la masa emitida a la atmósfera de PM<sub>2.5</sub> y CO<sub>2</sub>, proveniente de fuentes vehiculares del AMM, asociada con la distancia recorrida por vehículo y el volumen de combustible consumido.
2. Identificar las especies químicas que constituyen a la masa total emitida de PM<sub>2.5</sub> proveniente de los gases de combustión de una flota vehicular representativa del AMM, mediante la estimación de perfiles químicos de emisión.



### 1.3 ALCANCES

El estudio, aquí presente, se llevó a cabo en el túnel de la Loma Larga ubicado al sur de la Ciudad de Monterrey. El interés de este experimento estuvo orientado al análisis de emisiones de vehículos particulares, que utilizan gasolina como combustible, debido a que la flota vehicular, que circula a través de este túnel, está integrada principalmente por vehículos de esta categoría. El experimento se realizó en el mes de junio del año 2009 durante un período de seis días. Los muestreos fueron realizados durante intervalos de dos horas y media en horarios de tráfico alto y moderado, para los cuales se determinaron factores de emisión. Se hicieron dos muestreos de esta duración por día, los cuales integraron a una corrida experimental. Se obtuvieron promedios de las emisiones generadas durante cada corrida y no emisiones puntuales.

Con respecto a la metodología, en los monitoreos de  $PM_{2.5}$  se utilizaron equipos de bajo volumen (MiniVol Portable Air Sampler, Airmetrics<sup>TM</sup>). Los equipos fueron colocados en dos puntos de monitoreo, uno a la entrada y otro en la parte media de cada tubo del túnel. Las muestras tomadas se recolectaron en filtros de teflón y cuarzo de 47 mm. En los filtros de teflón se determinó la masa recolectada, por gravimetría, y 38 metales (Na al Pb), por Fluorescencia de Rayos-X (Método IO-3.3 de la US EPA). En los filtros de cuarzo se determinaron cationes ( $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $NH_4^+$ ) y aniones ( $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ), por cromatografía de iones, y carbón orgánico y elemental, por transmitancia termo-óptica (Método 5040 del NIOSH). Todos estos análisis químicos fueron realizados en el extranjero por un laboratorio certificado.

Se realizó un aforo vehicular para el conteo y clasificación del tipo de vehículos a través de un sistema de video-filmación. Se determinó la velocidad promedio de los vehículos mediante el tiempo que tardaban en recorrer la distancia entre los dos puntos de monitoreo. Para determinar el tiempo se filmó el flujo vehicular en ambos puntos de monitoreo al mismo tiempo, usando dos cámaras digitales. Para determinar los niveles de  $CO_2$ , temperatura y presión dentro del túnel, se utilizaron dos sondas para mediciones de la calidad del aire, mientras que las velocidades de viento fueron medidas con dos anemómetros de hilo caliente. Finalmente, los factores de emisión estimados en este estudio, eventualmente, pueden ser usados para el cálculo de inventarios de emisión.

## 1.4 JUSTIFICACIÓN

Estamos en una época en la que el desarrollo de nueva tecnología se lleva a cabo de manera consistente. La industria automotriz no es la excepción, ya que desde los años 90's se han implementado en México nuevos dispositivos para disminuir las emisiones de contaminantes, así como diversas mejoras tecnológicas para beneficio del medio ambiente (Cadle *et al.*, 2008). Cada una de las investigaciones realizadas son promotoras de las innovaciones tecnológicas que se implementan constantemente. Todos estos avances surgen de la necesidad y dependencia que hoy en día la población tiene de estos recursos, que son los vehículos automotores. Esto se manifiesta principalmente en grandes zonas urbanas, como lo es la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) en la que se ha estimado que el 80% de la contaminación del aire se debe a emisiones de fuentes móviles (Schifter *et al.*, 2000). Además, se ha determinado en estudios que las fuentes móviles a gasolina contribuyen con un 28% de las emisiones de  $PM_{2.5}$  observadas y los vehículos a diesel con un 10%. Por lo que el 74% de las emisiones totales de  $PM_{2.5}$  provenientes de fuentes móviles son generadas por vehículos que utilizan gasolina como combustible (Gertler *et al.*, 2005). Debido a esto, es importante mantener actualizada la base de datos sobre emisiones de fuentes vehiculares de las zonas urbanas. El inventario de emisiones, para fuentes móviles del AMM, más reciente fue el realizado por Bautista *et al.*, 2008. Lo ideal es contar con factores de emisión más recientes que nos permitan estimar con menor incertidumbre y mayor representatividad las emisiones generadas por vehículos en la actualidad. Para ello, resulta conveniente recurrir a métodos alternativos, como la estimación de factores de emisión, que nos permitan extrapolar las emisiones de inventarios pasados al presente, con el objeto de tener valores representativos de los niveles de contaminación actuales. Es posible, utilizar factores de emisión de otros sitios, sin embargo esto no es tan confiable como contar con factores característicos del sitio de interés.

La contaminación por emisiones de fuentes vehiculares se vincula con estudios médicos recientes (Franklin *et al.*, 2007; Choi *et al.*, 2009; Branis *et al.*, 2009; Díaz y Domínguez, 2009) en los cuales se han relacionado a las partículas finas suspendidas con daños a la salud humana. En estos estudios se asocia a las partículas suspendidas de diámetro aerodinámico menor a 2.5 micrómetros con problemas respiratorios y cardiovasculares.

Además de los efectos en la salud, en las grandes urbes se puede observar que las emisiones de vehículos, el desgaste de frenos y neumáticos, así como el desgaste del pavimento contribuyen significativamente a la cantidad total emitida de partículas suspendidas (Garg *et al.*, 2000; Gillies *et al.*, 2001; Zhu *et al.*, 2002).

A pesar de las diversas clases de problemas existentes relacionados con la calidad del aire y daños a la salud, en México se requieren más informes de la composición química de las emisiones de PM<sub>2.5</sub> (Vega *et al.*, 2000). Una forma de estimar emisiones provenientes de fuentes vehiculares requiere de un escenario en el que los vehículos estén sometidos bajo condiciones reales de manejo. Existen estudios que han llevado a cabo pruebas en dinamómetros (Schifter *et al.*, 2000) en los cuales se ha logrado simular ciclos de manejo complejos mediante procedimientos o protocolos establecidos (por ejemplo el “*Federal Test Procedure*”, FTP-75, de los EE.UU.). Las pruebas realizadas en dinamómetros se limitan a una cierta flota vehicular con determinado mantenimiento, año y tipo de vehículos. Por tal motivo en este estudio se realizó, una estimación de factores de emisión, mediante la aplicación de una metodología para mediciones en túneles la cual se llevó a cabo en el complejo del “Túnel de la Loma Larga”. En este complejo se pudieron obtener mediciones provenientes de fuentes vehiculares, representativas de una flota vehicular del AMM, bajo condiciones normales de manejo.

## CAPÍTULO 2

### VÍNCULO ENTRE EMISIONES DE FUENTES MÓVILES Y PM<sub>2.5</sub>

En este capítulo se describen los diferentes métodos en que se pueden estimar factores de emisión de fuentes móviles. Se resumen diversos experimentos, realizados en diferentes sitios, que utilizaron técnicas de medición en túneles para la estimación de factores de emisión de PM<sub>2.5</sub>. Además, se menciona de manera breve el enlace existente entre esta temática y nuestro país.

#### 2.1. EMISIONES DE FUENTES VEHICULARES

Existen estudios que demuestran que los vehículos de pasajeros, tanto a base de gasolina como diesel, son las principales fuentes de emisiones de contaminantes a la atmósfera. En zonas urbanas, estas fuentes contribuyen de manera significativa a las emisiones de partículas suspendidas finas (Zhu *et al.*, 2002; Charron y Harrison, 2003). Estas partículas provienen desde el desgaste de los sistemas de frenado y llantas hasta las emisiones de escape y evaporativas (Cheng *et al.*, 2006). En México existen algunos estudios sobre emisiones de PM<sub>2.5</sub> provenientes de fuentes vehiculares (Zavala *et al.*, 2006; Bautista, 2007; Salcedo *et al.*, 2006; Machado *et al.*, 2008).

##### 2.1.1 TÉCNICAS DE MEDICIÓN

La naturaleza de las emisiones de vehículos son controladas por muchos factores, tales como: la composición del combustible, condiciones del motor, tipo de motor y su eficiencia, carga vehicular y condiciones del camino o carretera. Sin embargo, el factor más importante que debe considerarse para determinar factores de emisión provenientes de fuentes vehiculares es el ciclo de manejo bajo el cual están sometidas contantemente estas fuentes. Tratar de simular un ciclo de manejo bajo condiciones normales resulta una tarea muy difícil, ya que estos ciclos son demasiado complejos. A partir de ésto, existen cuatro métodos principales mediante los cuales se pueden estimar factores de emisión para fuentes vehiculares, éstos son:

- ◆ Pruebas en dinamómetro.
- ◆ Detección remota (“*remote sensing*”).
- ◆ Pruebas en túneles.
- ◆ Técnica de persecución (“*chase technique*”).

En las pruebas de dinamómetro, se toma una muestra de las emisiones de escape mientras el vehículo es conducido sobre un dinamómetro de chasis de acuerdo a un ciclo de manejo prescrito. Este ciclo de manejo puede obtenerse de algún protocolo o procedimiento establecido, como el FTP-75 (*Federal Test Procedure*, EE.UU.), el “*European Test Procedure*” o el “*Japanese Test Procedure*”. Las muestras de gases de combustión se introducen a una cámara de dilución, donde se logra un sistema a volumen constante que posteriormente es analizado para la detección de especies químicas contaminantes de interés.

La detección remota es una herramienta eficaz para medir emisiones de contaminantes, ya que permite una evaluación de una gran cantidad de vehículos bajo condiciones normales de manejo dentro de un período corto. Esta técnica involucra el uso de un sensor espectroscópico remoto mediante el cual se mide la absorción de luz en una pluma de gases de combustión. Este sensor se coloca cerca del camino a través del cual transitan los vehículos y a partir de los niveles de absorción registrados se obtienen las concentraciones de los diferentes contaminantes. Las emisiones son expresadas como una razón entre la especie de interés y el CO<sub>2</sub>, y posteriormente son normalizadas a combustible consumido, basándose en la estequiometría de los procesos de combustión. Esta técnica se utiliza principalmente para gases, por lo que no es conveniente utilizarla para partículas, ya que no se obtendrían resultados confiables (El-Fadel y Hashisho, 2001).

Las pruebas en túneles hacen uso de un sistema semiconfinado (tubo del túnel) a través del cual circulan exclusivamente fuentes vehiculares bajo condiciones normales de manejo, las cuales varían de acuerdo a las especificaciones técnicas del túnel. Esta técnica se basa en un balance de materia entre dos puntos, a los cuales se denominan como la entrada y salida del túnel. Por diferencia en las concentraciones entre estos dos puntos se determina la masa

emitida de contaminantes asociada con una unidad de actividad como kilómetro recorrido o masa de combustible consumido.

Existe una cuarta técnica denominada como “técnica de persecución” (Zavala *et al.*, 2006) que es comúnmente utilizada en esta clase de estudios. Dicha técnica consiste en la persecución de un vehículo mediante el uso de un laboratorio móvil equipado con instrumentos de respuesta rápida y alta sensibilidad de espectroscopia laser. Durante esta persecución se interceptan y miden las plumas de los gases de escape de los vehículos. A diferencia de la técnica de detección remota, la técnica de persecución hace una selección individual de vehículos. A pesar de que esta técnica garantiza el análisis de cada unidad bajo condiciones reales de manejo, se requiere una muestra grande de vehículos, así como largos períodos de tiempo para obtener valores representativos de emisiones.

### **2.1.2 DINAMÓMETRO VS TÚNEL**

La técnica en dinamómetro tiene la desventaja de que las pruebas son costosas y complejas. Estas limitaciones hacen que la cantidad pequeña de vehículos de prueba, no sea representativa de la composición global de las flotas vehiculares de una zona urbana en particular. Sin embargo, con esta técnica se tiene un control de las condiciones de prueba y una comparación relevante de los valores obtenidos (Jamriska *et al.*, 2004).

A diferencia de las pruebas en dinamómetro, las pruebas en túneles pueden llegar a ser menos costosas y complejas si nos referimos al número de vehículos que podemos llegar a muestrear en un túnel, además proporcionan factores de emisión representativos de la composición entera de la flota vehicular de una zona de estudio en particular. Una desventaja de esta técnica consiste en el control limitado sobre las condiciones en las cuales se llevan a cabo las mediciones, tanto en términos de las condiciones meteorológicas que afectan las concentraciones medidas como la mezcla de vehículos. A pesar de las desventajas, las pruebas en túneles resultan una alternativa para determinar factores de emisión de vehículos mediante la medición de la concentración de un contaminante en las proximidades de las carreteras, así como de un monitoreo del tráfico vehicular. Para esta técnica no existe algún procedimiento estándar establecido (Cheng *et al.*, 2006). En la

Tabla 1 se muestran algunos resultados de factores de emisión para partículas obtenidos de diferentes estudios realizados a lo largo del mundo, de estas dos técnicas.

**Tabla 1.** Comparación de FE para PM entre diferentes técnicas de medición.

Referencia	Método	Tamaño de partícula	FE gasolina (g-km <sup>-1</sup> -veh <sup>-1</sup> )	FE Diesel (g-km <sup>-1</sup> -veh <sup>-1</sup> )
Wittorf <i>et al.</i> , 1994	Túnel	PM <sub>10</sub>	0.0093±0.0373	0.416±0.081
Rogak <i>et al.</i> , 1994	Túnel	PM <sub>2.5</sub>	0.0043±0.0043	0.284±0.155
Rogak <i>et al.</i> , 1997	Túnel	PM <sub>10</sub>	0.00±0.02	0.68±0.21
Weingartner <i>et al.</i> , 1997	Túnel	PM <sub>3.0</sub>	-0.0008±0.0014 <sup>a</sup>	0.313±0.012
Allen <i>et al.</i> , 2001	Túnel	PM <sub>1.9</sub>	0.430±0.079 (LD <sup>b</sup> ) 0.085±0.006 (HD <sup>c</sup> )	N.C. <sup>d</sup>
Gillies <i>et al.</i> , 2001	Túnel	PM <sub>2.5</sub>	0.052±0.027	N.C.
Jamriska <i>et al.</i> , 2004	Túnel	PM <sub>2.5</sub>	N.C.	0.267±0.207
Cheng <i>et al.</i> , 2006	Túnel	PM <sub>2.5</sub>	N.C.	0.257±0.031
Metz, 1993	Dinamómetro	PST	N.C.	0.30±0.06
Cadle <i>et al.</i> , 1997	Dinamómetro	PM <sub>10</sub>	0.086	N.C.
Sagebiel <i>et al.</i> , 1997	Dinamómetro	PM <sub>10</sub>	0.114	N.C.

<sup>a</sup> El valor negativo se debe a errores cometidos durante el cálculo de FE para vehículos a gasolina.

<sup>b</sup> Vehículos clasificados como carros de pasajeros con un peso neto menor a 8,500 libras (*Light Duty*).

<sup>c</sup> Vehículos clasificados como carros o camiones de trabajo pesado con un peso neto mayor a 8,501 libras (*Heavy Duty*).

<sup>d</sup> No se determinó.

En la tabla anterior podemos observar que los estudios más recientes, para PM<sub>2.5</sub>, se han llevado a cabo en túneles. Además, se puede apreciar que los vehículos a diesel emiten mayor cantidad de partículas que los vehículos a gasolina. Cabe apuntar también que las pruebas en túneles están limitadas en cuanto al rango de velocidades de los vehículos mientras que los dinamómetros si capturan las variaciones de los ciclos de manejo.

## 2.2 TÉCNICAS EN TÚNELES

El análisis de vehículos individuales presenta una diversidad de perfiles de emisión, que están relacionados con el tipo de vehículo, marca y modelo, lo que pudiera no ser representativo de una flota específica. Debido a esto, los resultados individuales deben ser complementados para zonas urbanas. Los estudios realizados en túneles para estimar factores de emisión evalúan una gran cantidad de vehículos bajo condiciones normales de manejo, además de que éstos hacen uso del combustible local. Las flotas vehiculares, aparte de ser grandes, comprenden una mezcla de modelos y marcas de vehículos de diferentes edades y tipos de mantenimiento. Mediante estos experimentos se puede estimar la contribución promedio no solo de las emisiones de escape, sino también las evaporativas, resuspensión de polvos, desgaste de llantas, entre otros.

Estos estudios se pueden realizar en intervalos de tiempo relativamente largos, sin embargo los resultados de las muestras de emisiones recolectadas serían valores promedio, debido a que las flotas vehiculares no son homogéneas o uniformes. Cabe mencionar que en esta clase de experimentos deben considerarse una gran variedad de factores o parámetros relacionados con el control de contaminantes dentro de túneles (Tabla 2). En el mundo se han realizado una variedad de estudios en túneles con el objetivo de obtener factores de emisión para diferentes especies químicas o contaminantes, algunos de estos estudios orientados al estudio de  $PM_{2.5}$  y  $CO_2$ , se mencionan a continuación.

### **2.2.1. Caldecott Tunnel, San Francisco Bay Area, USA (Allen et al., 2001).**

En este estudio se determinaron factores de emisión para  $PM_{1,9}$  en el estado de California (EE.UU.). Se realizaron cuatro corridas experimentales de tres horas cada una llevadas a cabo en un intervalo de tiempo de 4 días. Se registró una flota de 37,500 vehículos entre vehículos de combustible ligero y pesado. El túnel cuenta con una longitud de 1,100 metros, con dos tubos y tres carriles cada uno. Se determinó la composición química como una función del tamaño de partícula. Se reportaron concentraciones de aerosoles, carbón orgánico (OC), carbón elemental (EC), ión sulfato, ión nitrato, ión amonio y 13 elementos más. Como resultado relevante se observó que más del 90% de las emisiones de  $PM_{1,9}$  y  $PM_{10}$  están dominadas por OC y EC, tanto en vehículos para trabajo ligero como pesado.



En un estudio previo, realizado en este túnel (Kirchtetter et al., 1999) se determinó una concentración de carbón elemental (PM<sub>2.5</sub>) de 33±4% para vehículos de trabajo ligero.

**Tabla 2.** Parámetros relacionados con el control de contaminantes dentro de túneles (El-Fadel y Hashisho, 2001).

<b>Categoría</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>
<b>Túnel</b>	Gradiente	Dirección o direcciones a las cuales tiende a fluir el aire de acuerdo al tránsito vehicular.
	Geometría	Diseño del túnel. Tubos separados, uno en cada dirección, lo que generaría el denominado “ <i>Flujo Pistón</i> ” en el que aire fluye en la misma dirección que los vehículos. Si ambos sentidos estuvieran dentro de un mismo tubo, el movimiento del aire sería más lento lo que repercutiría en altas concentraciones de contaminantes.
	Ventilación	Depende en gran medida de la longitud del túnel. Entre más largo más complejo debe ser el sistema de ventilación para mantener diluido el aire, con el objeto de controlar los niveles contaminación dentro del túnel.
<b>Flota vehicular</b>	Edad y clase	Los vehículos viejos contaminan más debido a un mal funcionamiento y deterioro.
	Tecnología	Entre más modernos sean los vehículos, éstos contarán con sistemas de control de emisiones más sofisticados que reducen las emisiones al máximo.
	Calidad del combustible	La composición de los gases de combustión refleja el tipo de combustible utilizado.
	Tipo de motor	Motores a base de gasolina, diesel u otra fuente de energía.
<b>Ciclo de Manejo</b>	Tráfico lento (“ <i>stop and go</i> ”)	El acelerar y desacelerar constantemente incrementa las emisiones.
	Volumen de tráfico	Un incremento en el flujo vehicular estará acompañado por un incremento en la concentración de contaminantes dentro del túnel.
	Temperatura	A menor temperatura mayor cantidad de emisiones.
	Inspección, mantenimiento y estándares de emisión.	Entre más deteriorado se encuentren los vehículos mayores serán las emisiones generadas.
	Limpieza y mantenimiento del túnel.	Un incremento en la velocidad de viento dentro del túnel genera resuspensión de partículas.

### **2.2.2. Shing Mung Tunnel, Hong Kong (Cheng et al., 2006).**

Se determinaron factores de emisión de  $PM_{2.5}$ ,  $NO_x$  y CO para fuentes vehiculares. Se realizaron un total de 16 corridas experimentales, cuatro de ellas con duración de una hora (verano) y 12 con duración de dos horas (invierno). Durante el estudio, un total de 27,310 vehículos atravesaron el túnel donde 50% eran diesel, 41% Gasolina y 9% LPG. Los factores de emisión de  $PM_{2.5}$  mostraron una buena relación lineal con los  $NO_x$  ( $R^2 = 0.65$ ). Mediante un análisis estadístico de los datos se demostró que no existe diferencia significativa entre realizar el estudio en invierno o verano.

### **2.2.3. Woolloongabba Tunnel, Brisbane City, Australia (Jamriska et al., 2004).**

Este túnel tiene una longitud de 511 metros y fue exclusivamente para vehículos a diesel. La campaña de monitoreo duró dos días donde se registró una muestra de 300 autobuses, con la que se determinaron factores de emisión para  $PM_{2.5}$ . Las concentraciones se midieron continuamente en la entrada y salida del túnel. La densidad de tráfico vehicular a través de del túnel fue pequeña por lo que se determinó un perfil de fondo dentro del mismo con el objetivo de disminuir la incertidumbre al momento de la estimación de factores de emisión. Se obtuvo un resultado de  $583 \pm 451 \text{ mg-veh}^{-1}\text{km}^{-1}$ , el cual mostró una buena concordancia con los factores de emisión determinados a partir de pruebas en dinamómetro para 12 autobuses pertenecientes a la misma flota vehicular de este estudio. Los estudios en dinamómetro y en túneles proporcionan resultados comparables que permiten la evaluación del efecto del tráfico en la contaminación debida a partículas en el aire.

### **2.3.4. Sepulveda Tunnel, Los Angeles, California, USA (Gillies et al., 2001).**

Se estimaron factores de emisión para una mezcla de vehículos ligeros y pesados, así como la caracterización de las especies químicas predominantes. Se recolectaron 17 muestras en pruebas de una hora en un túnel de 582 metros de longitud. Se correlacionaron las  $PM_{2.5}$  con las  $PM_{10}$  y  $NO_x$  para mostrar su dependencia con cada uno éstas sustancias. Las  $PM_{2.5}$  no mostraron dependencia con respecto a la velocidad de los vehículos como lo hicieron las  $PM_{10}$ , sin embargo, mostraron una buena correlación con los  $NO_x$  ( $R^2 = 0.83$ ).

### **2.3.5. Söderleds Tunnel, Stockholm, Sweden (Kristensson et al., 2004).**

Para una flota de más de 30,000 vehículos se estimaron factores de emisión para PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>x</sub>, entre otros. La muestra consistió en un 95% de vehículos ligeros (LD) y un 5% de vehículos pesados (HD). El túnel tiene una longitud de 1,500 metros, donde se colocaron dos sitios de monitoreo. En este estudio se analizó la dependencia de las emisiones de PM con respecto a la velocidad, encontrándose que las PM<sub>2.5</sub> presentan una gran dependencia a velocidades mayores a 70 km/hr. La cantidad de partículas entre una velocidad de 70 km/hr y 90 km/hr mostró un incremento de  $2.7 \times 10^{14}$  a  $11 \times 10^{14}$  partículas por kilómetro recorrido. Además se estimó un factor de emisión de PM<sub>2.5</sub> de  $67 \pm 4$  mg veh<sup>-1</sup>km<sup>-1</sup>.

### **2.3.6. Gubrist Tunnel, Zürich, Switzerland (Weingartner et al., 1997).**

En este estudio se llevaron a cabo mediciones continuas para determinar emisiones de aerosoles (PM<sub>3</sub>) en un túnel de 3,250 metros de longitud durante un período de seis días. El túnel presenta una pendiente ascendente de 1.3% y se registro una velocidad de viento promedio de 2.7 m/s. Las concentraciones de carbón elemental fueron entre tres y cuatro veces mayor en la salida que en la entrada y las concentraciones de PM<sub>3</sub> entre cinco y diez veces. Se estimaron factores de  $8.53 \pm 0.47$  mg veh<sup>-1</sup>km<sup>-1</sup> y  $383.5 \pm 10.7$  mg veh<sup>-1</sup>km<sup>-1</sup> para vehículos de trabajo ligero (LD) y pesado, respectivamente. Para vehículos a gasolina se obtuvieron factores de emisión negativos, debido a que los valores residuales o de error aleatorio del modelo utilizado. Los factores de emisión para vehículos de gasolina y diesel fueron de  $-0.84 \pm 1.36$  mg veh<sup>-1</sup>km<sup>-1</sup> y  $313.0 \pm 12.1$  mg veh<sup>-1</sup>km<sup>-1</sup>. Durante el tiempo de residencia en el túnel, las partículas sufrieron cambios, esto debido a la adsorción de material volátil desde la fase gaseosa hasta la superficie de las partículas.

### **2.3.7. Gelezinis Vilkas Tunnel, Vilnius, Lithuania (Valiulis et al., 2002).**

Se realizaron mediciones para determinar factores de emisión de metales pesados, los cuales se sugiere provienen de las emisiones de fuentes vehiculares. El túnel donde se llevo a cabo este experimento consta de 262 m de longitud y una altura de 5.5 m. Cuenta con dos tubos, en direcciones contrarias, con tres carriles cada uno. Las muestras de aerosoles fueron recolectadas en filtros de teflón usando un Impactor Virtual a un flujo de 16.7 LPM. Se registraron velocidades de viento de  $2.30 \pm 0.07$  m/s y el 90% de la flota vehicular

muestreada fueron vehículos de trabajo ligero (LD). Se obtuvieron emisiones de  $128 \pm 11$  g  $\text{veh}^{-1}\text{km}^{-1}$  de  $\text{CO}_2$  y para los siguientes metales ( $\text{PM}_{2.5}$ ) de:  $0.092 \pm 0.026$  de Zn,  $0.035 \pm 0.006$  de Pb,  $0.020 \pm 0.006$  de Mn,  $0.102 \pm 0.008$  de Ba y  $0.061 \pm 0.009$  de Cu, en unidades de  $\text{mg-veh}^{-1}\text{km}^{-1}$ . En este estudio se encontró una buena concordancia entre las técnicas de medición en túneles y de perfiles de concentración vertical.

### **2.3.8. Fort McHenry y Tuscarora Mountain Tunnels, U.S.A. (Pierson et al., 1996).**

El Túnel de Fort McHenry se encuentra localizado en la ciudad de Baltimore y tiene una longitud de 2,174 m. En este estudio, se analizó el efecto de la pendiente sobre las emisiones de  $\text{CO}_2$ . El túnel tiene una pendiente promedio, ascendente, de 3.3% y descendente de 1.8%. En este experimento se realizaron 11 corridas experimentales, durante las cuales se muestrearon 22,031 vehículos a gasolina. Se obtuvo un factor de emisión promedio, para vehículos de trabajo ligero, de  $175 \pm 1$  g- $\text{veh}^{-1}\text{km}^{-1}$  de  $\text{CO}_2$  y un rendimiento vehicular de  $12.6 \pm 0.6$  km/L. En este estudio las emisiones “pendiente arriba” fueron hasta el doble de las emisiones “pendiente abajo”, para las emisiones en función de la distancia recorrida.

En la ciudad de Pennsylvania se encuentra el Túnel Tuscarora, que cuenta con una longitud de 1,623 m y no presenta inclinación. En este túnel se realizó un experimento de 11 corridas, durante las cuales se muestrearon 4,887 vehículos de trabajo ligero, para determinar factores de emisión de  $\text{CO}_2$ . Se utilizaron bolsas *Tedlar* para recolectar las muestras de aire y se determinaron emisiones, de  $\text{CO}_2$ , de  $144 \pm 7$  g- $\text{veh}^{-1}\text{mi}^{-1}$  y un rendimiento de  $15.4 \pm 0.8$  mi/gal.

### **2.3.9. Kilborn Tunnel y Howell Tunnel, Milwaukee, U.S.A (Lough et al., 2005).**

Se realizaron mediciones en dos túneles para determinar emisiones de  $\text{PM}_{2.5}$  provenientes de fuentes móviles. En el primero, llamado Kilborn Tunnel, se realizaron cinco corridas experimentales, durante períodos de cuatro horas. El complejo presenta una pendiente ascendente del 1% y un sistema de ventilación forzada a mediación del túnel. Los equipos de muestreo se colocaron a 5 m de la entrada y a 15 m antes del sistema de ventilación. La distancia entre ambos puntos de muestreo fue de 200 m. En el segundo túnel, *Howell*

*Tunnel*, se realizaron 11 corridas, durante períodos entre cuatro y ocho horas. Este túnel es plano y la distancia entre los puntos de muestreo fue de 215 m.

Para el muestreo de  $PM_{2.5}$  se utilizaron flujos de 8.0 LPM y se obtuvo un factor de emisión, promedio entre ambos túneles de  $PM_{2.5}$ , de  $33.4 \pm 5.3 \text{ mg-veh}^{-1}\text{km}^{-1}$ . Además se determinó una emisión de  $9.2 \pm 1.8 \text{ mg-veh}^{-1}\text{km}^{-1}$  de carbón orgánico y  $6.0 \pm 5.3 \text{ mg-veh}^{-1}\text{km}^{-1}$  de carbón elemental.

Algunos de los resultados obtenidos en los estudios descritos previamente, se muestran en la Tabla 3. Además, existen otros experimentos realizados en túneles que no solo se enfocan en materia particulada: Funasaka *et al.*, 1998; Gertler *et al.*, 1997; Stemmler *et al.*, 2004; Fraser *et al.*, 1998; Martins *et al.*, 2006; McGaughey *et al.*, 2004; Hwa *et al.*, 2002; Touaty *et al.*, 2000; Song *et al.*, 2005; Grosjean *et al.*, 2001; Legreid *et al.*, 2007; Schmid *et al.*, 2001. Sin embargo, debido a la naturaleza y enfoque de este estudio se destacan los trabajos realizados para determinar factores de emisión de  $PM_{2.5}$  en túneles.

**Tabla 3.** Comparación de Factores de emisión obtenidos en algunos estudios realizados en túneles.

Túnel	Longitud (m)	Instrumento	Tipo de vehículo	PM <sub>2.5</sub> (mg/km-veh)
Caldecott Tunnel, San Francisco Bay Area (Allen <i>et al.</i> , 2001)	1,100	MOUDI <sup>a</sup>	HD <sup>d</sup>	430±79
			LD <sup>d</sup>	85±6
Shing Mun Tunnel, Hong Kong (Cheng <i>et al.</i> , 2006)	2,600	Muestreador portátil DRI <sup>b</sup>	Promedio	131±37
			Diesel	257±31
Woolloongabba Tunnel, Brisbane City (Jamriska <i>et al.</i> , 2004)	511	TEOM <sup>c</sup>	Diesel	267±207
Sepulveda Tunnel (Gillies <i>et al.</i> , 2001)	582	Muestreador de volumen medio	Promedio (HD <sup>d</sup> , LD <sup>d</sup> )	52±27
Söderledstunnel, Stockholm, Sweden (Kristensson <i>et al.</i> , 2004)	1,500	TEOM <sup>c</sup>	Promedio	67±5

<sup>a</sup> Micro-Orifice Uniform Deposition Impactors; <sup>b</sup> Desert Research Institute, USA; <sup>c</sup> Tapered Element Oscillating Microbalance; <sup>d</sup> Como <sup>b</sup> y <sup>c</sup> de la Tabla 1.

### 2.3 ESTUDIOS EN MÉXICO

En nuestro país se han realizado estudios sobre contaminación atmosférica, principalmente en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). Estos estudios han permitido la caracterización de emisiones, generadas al medio ambiente, de diversas fuentes antropogénicas y biogénicas. Estos experimentos han puesto un principal interés a las fuentes vehiculares, las cuales se ha demostrado que son las fuentes que más aportan contaminantes a la atmósfera. En el 2003 se realizó en el ZMVM una campaña de monitoreo mediante el uso de un laboratorio móvil, a través del cual se caracterizaron las emisiones de fuentes vehiculares (Zavala *et al.*, 2006). Los valores obtenidos fueron representativos de una flota vehicular sometida bajo condiciones reales de manejo. Los resultados mostraron que la técnica empleada (“*car-chasing*”) es capaz de diferenciar entre los diferentes tipos de vehículos y combustibles. En el mismo año se llevo a cabo otra

campana en el ZMVM en la que se estimaron emisiones de  $PM_{2.5}$  (Salcedo *et al.*, 2006). En este experimento se encontró que la masa total de partículas suspendidas recolectada en el ZMVM estaba compuesta por un 54.6% de compuestos orgánicos, 27.5% de compuestos inorgánicos, 11% de carbón negro y un 6.7% de partículas provenientes de polvos de suelo. De estos resultados se puede pronosticar la cantidad de partículas que provienen de fuentes vehiculares, ya que como se menciono anteriormente, el 80% de las emisiones totales son emitidas por estas fuentes (INE y SEMARNAT, 1999). La comparación de estos estudios, con otros experimentos, muestra una gran similitud, sin embargo siguen existiendo algunas diferencias debido a la variabilidad de las condiciones meteorológicas.

A pesar de que no existen estudios que usen la metodología de mediciones en túneles para determinar factores de emisión de  $PM_{2.5}$ , existe uno en el que se utilizó esta técnica para determinar las emisiones de otro tipo de contaminantes. Tal estudio fue realizado en la ciudad de México en mayo de 1996 (Vega *et al.*, 2000). Este estudio se llevo a cabo en un túnel pequeño de aproximadamente 365 metros de longitud, 7.77 metros de ancho y 4.30 metros de altura, en donde se recolectaron diez muestras durante un período de tres días. El objetivo fue determinar el perfil de emisiones de una flota vehicular representativa bajo condiciones normales de manejo. El túnel es relativamente pequeño en comparación con los que se han realizados en otras partes del mundo donde los túneles son considerablemente más grandes. Este experimento se realizó en conjunto con una prueba de dinamómetro de chasis, donde se encontró que ambas pruebas, tanto en dinamómetro como en túneles, resultaron ser complementarias. Las pruebas de dinamómetro permitieron diferenciar entre las emisiones de escape y evaporativas, además se mostro que las emisiones dependen del tipo de vehículo, del modelo y del mantenimiento. Por otra parte, en la prueba realizada en el túnel, la flota vehicular fue mucho mayor. Esto compensó los altos niveles de emisión de vehículos viejos con las emisiones de los vehículos nuevos y con mejores tecnologías. Este estudio es de gran importancia por sus resultados altamente representativos de la zona metropolitana de la Ciudad de México.

Debido a la escasez de estudios de esta naturaleza en México y a la falta de información reciente y confiable sobre perfiles y factores de emisiones de fuentes vehiculares, se hizo

un estudio en el túnel de la Loma Larga ubicado al sur del AMM. Este estudio que se plasma en este trabajo tuvo como objetivo determinar perfiles y factores de emisiones de una flota vehicular representativa del AMM. El experimento que se muestra en este trabajo es una aportación más a esta clase de estudios.

Los resultados de este estudio son valiosos, ya que nos permiten apreciar el serio problema que representan las fuentes móviles a la contaminación atmosférica. Además nos permiten estimar emisiones a lo largo del tiempo, mientras se realizan estudios recientes que permitan mantener actualizados los inventarios de emisión.



## CAPÍTULO 3

### METODOLOGÍA

En este capítulo se describe la metodología que se llevo a cabo para el monitoreo de CO<sub>2</sub> y partículas PM<sub>2.5</sub> en el túnel de la Loma Larga ubicado en el AMM. Además se definen los materiales y equipos utilizados, la caracterización y los análisis químicos de las partículas PM<sub>2.5</sub>, así como el análisis estadístico y trabajo de datos para la obtención de los resultados finales (factores de emisión).

#### 3.1 MATERIALES Y EQUIPOS

##### 3.1.1 Muestreador de aire

El muestreo de partículas suspendidas se realizó mediante muestreadores de bajo volumen (MiniVol) de la marca Airmetrics™ (Figura 1). Estos equipos consisten en una bomba de succión mediante la cual se hace pasar un flujo de aire a través de un impactor que se encarga de separar las partículas del corte aerodinámico seleccionado. Posteriormente, el flujo de aire pasa por un filtro de 47 mm donde se acumulan las partículas hasta que finalice el tiempo de muestreo. El impactor y filtro integran un accesorio denominado “cabezal” que se muestra en la Figura 2.

Este equipo cuenta con un sistema de programación (Figura 3) que permite un encendido y apagado automático. Además, dispone de un rotámetro y manómetro digital para el control del volumen y la calibración del flujo, respectivamente. Los flujos de operación del equipo oscilan entre cinco y diez litros por minuto (LPM). El MiniVol, puede ser utilizado para recolectar muestras de PST (Partículas Suspendidas Totales), PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y gases no reactivos. En este experimento se utilizaron cuatro muestreadores de bajo volumen. Dos de ellos utilizaron filtros de cuarzo y los otros dos filtros de teflón, y se calibraron con flujos de 7.4 LPM y 5.5 LPM, respectivamente.

Cada uno de estos equipos puede programarse para realizar hasta seis corridas experimentales dentro de un intervalo de 24 horas a lo largo de una semana. Es capaz de operar con fuentes de corriente directa y alterna. Cuenta con baterías recargables con una

duración aproximada de 24 horas. Todo el equipo está construido con PVC que lo hace resistente a diferentes condiciones ambientales. Además, cuenta con indicadores de fallas tanto para batería baja como obstrucción del flujo. Todas estas características convierten al MiniVol en una herramienta versátil, ya que permite ser transportado a lugares donde se carece de las condiciones necesarias para que otros equipos pudieran funcionar.



Figura 1. Muestreador de bajo volumen (MiniVol Air Sampler).



Figura 2. Tipos de cabezal para muestreadores de bajo volumen.

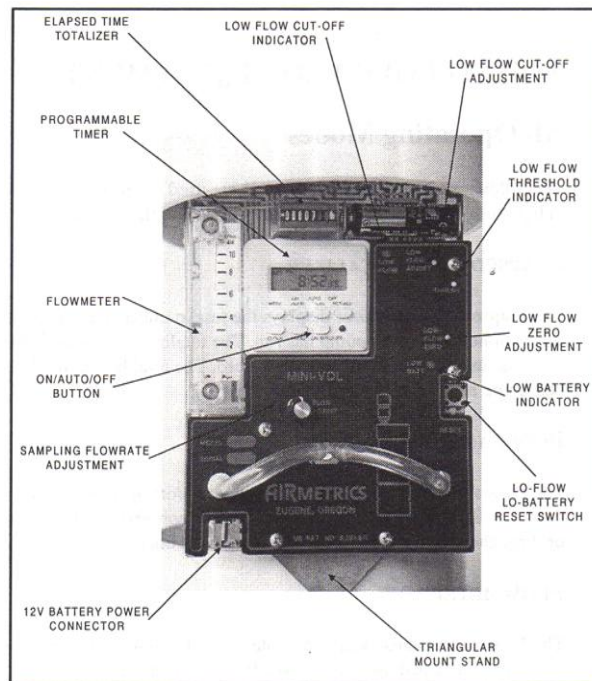


Figura 3. Controles para programación y ajustes de un Muestreador de bajo volumen.

### 3.1.2 Filtros

El tipo de filtro que se utiliza para recolectar muestras durante una campaña de monitoreo ambiental depende del equipo, del tratamiento previo al muestreo y del tipo de sustancias que se pretenden identificar. Para esto existe una gran variedad de filtros con diferentes propiedades físicas y químicas (Tabla 4) que permiten cumplir con los requerimientos necesarios para llevar a cabo diversos análisis químicos. Para una selección apropiada de filtros es importante considerar los siguientes factores: eficiencia de colección, estabilidad mecánica, estabilidad química, estabilidad térmica, resistencia al flujo, capacidad de carga, disponibilidad y costo (Pardo, 2005).

**Tabla 4.** Tipos de filtros y sus características.

Tipo de filtro	Superficie	Temperatura Máxima	Propiedades
<b>Celulosa</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fibras</li> <li>• No homogénea de 0.5 mm</li> <li>• Opaca</li> <li>• Baja eficiencia de colección</li> <li>• Alta resistencia mecánica</li> </ul>	150 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hidrofílico</li> <li>• Higroscópico</li> <li>• Fácilmente soluble para análisis de absorción atómica.</li> <li>• Absorbe gases</li> </ul>
<b>PVC</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Opaca</li> <li>• Alta resistencia al flujo</li> </ul>	50 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hidrofóbico</li> <li>• Superficie no oxidante</li> <li>• Soluble en solvents orgánicos</li> <li>• Altamente higroscópico</li> </ul>
<b>Teflón</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Delgada</li> <li>• Semitransparente</li> <li>• No debe cortarse</li> </ul>	60 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hidrofóbico</li> <li>• No higroscópico</li> <li>• Inerte a gases, solvents, acidos y bases.</li> </ul>
<b>Policarbonato</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lisa, delgada y con poros tipo capilar</li> </ul>	60 oC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hidrofóbico</li> <li>• Poco higroscópico</li> </ul>
<b>Nylon Puro</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Película delgada</li> <li>• Opaca</li> <li>• No debe cortarse</li> </ul>	60 oC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parcialmente hidrofóbico</li> <li>• Alta retención de partícula</li> <li>• Poco higroscópico.</li> <li>• Absorción pasiva de NO, NO2, PAN y SO2</li> </ul>
<b>Cuarzo Puro</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Opaca</li> <li>• De alta a moderada eficiencia de colección</li> <li>• Moderada resistencia al flujo</li> <li>• Quebradiza</li> </ul>	> 900 oC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contiene Al, Si, Na y en ocasiones metales.</li> <li>• Absorción pasiva de vapores orgánicos, HNO3, NO2 y SO2</li> <li>• Poco higroscópico</li> </ul>

En este estudio se utilizaron filtros de teflón y cuarzo de 47 mm de diámetro de la marca Whatman. Estos filtros fueron utilizados por los muestreadores de bajo volumen (MiniVol) para la recolección de partículas. El tipo de filtro fue elegido en base a las especies químicas que se desean identificar a través de este experimento y al análisis químico requerido para ello.

### 3.1.3 Medidor de CO<sub>2</sub>

Para determinar las concentraciones de CO<sub>2</sub> se utilizó un instrumento de medición compacto multifuncional Testo 435. Este equipo se emplea para realizar análisis de la calidad del aire en espacios cerrados. El Testo 435 es un multifuncional por lo que se le pueden conectar diferentes tipos de sondas para medir diversos parámetros. La sonda que se utilizó en este experimento fue la IAQ (*Indoor Air Quality*), la cual permite medir los parámetros de CO<sub>2</sub>, humedad relativa, temperatura y presión. Los rangos de medición y precisión de esta sonda se listan en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Especificaciones técnicas del multifuncional Testo 435.

Parámetro	Rango de medición	Precisión	Resolución
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	0 a 9,999 ppm	± (50 ppm CO <sub>2</sub> ± 2% mv) (0 a 5000 ppm CO <sub>2</sub> ) ±(100 ppm CO <sub>2</sub> ±3% of mv) (5001 a 10000 ppm CO)	1 ppm
Humedad relativa (HR)	0 a 100%	±2 %RH (+2 a +98 %HR)	0.1%
Temperatura	0 a 50 °C	± 0.3 °C	0.1 °C
Presión	600 a 1150 hPa	± 5 hPa	0.1 hPa

Este equipo cuenta con un sistema de almacenamiento hasta para 10,000 lecturas. Funciona con tres pilas de mignon (2A) y cuenta con dimensiones de 225×74×46 mm, aproximadamente. Además cuenta con un software para el análisis y documentación de las mediciones realizadas. Durante este experimento se utilizaron dos equipos de éstos programados para tomar lecturas cada minuto durante intervalos de 2.5 horas.

### 3.1.4 Anemómetro

Las velocidades de viento requeridas fueron medidas con un anemómetro compacto de hilo caliente de la marca TESTO (Testo 425). Consiste en una sonda de manejo telescópico que puede alcanzar una longitud de hasta 820 mm. Este equipo permite medir los parámetros de velocidad de viento, temperatura y flujo volumétrico. Puede medir velocidades de hasta 20 m/s y temperaturas entre de hasta 70 °C (Tabla 6). Funciona con una batería de 9V con una duración aproximada de 20 horas, tiene dimensiones de 182×64×40 mm y un peso aproximado de 285 g.

**Tabla 6.** Especificaciones técnicas del anemómetro de hilo caliente (Testo 425).

Parámetro	Rango de Medición	Precisión	Resolución
Temperatura	-20 a +70 °C	±0.5 °C (0 a +60 °C)	0.1 °C
Velocidad	0 to +20 m/s	±(0.03 m/s +5% mv)	0.01 m/s

Este equipo no cuenta con un sistema de almacenamiento, por lo que las lecturas deben registrarse manualmente durante cada intervalo de muestreo. En este proyecto se registraron las velocidades de viento, cada tres minutos, en una bitácora de campo.

## 3.2 EXPERIMENTACIÓN

### 3.2.1. Trabajo de campo

En el caso de los MiniVols, antes de iniciar cada corrida experimental se verificó la calibración del flujo, por si existía alguna indicación de fallas, y la programación del equipo. Después de cada muestreo se retiró el cabezal completo de los MiniVols, sustituyéndolo por otro que contenía un filtro nuevo. Los cabezales se colocaron en bolsas de plástico, totalmente aislados. Posteriormente en un lugar limpio y con las condiciones adecuadas se extrajeron cuidadosamente los filtros de los cabezales y se colocaron en su empaque original (portafiltro) para su almacenamiento y posterior análisis. El almacenamiento requirió bajas temperaturas, por lo que se requirió de un sistema de refrigeración. En el caso de los equipos TESTO bastó simplemente con verificar el indicador de la batería y que las sondas estuvieran midiendo algunos valores antes de comenzar para que alcanzaran un modo estable en sus mediciones. Todas estas operaciones

se llevaron a cabo en campo, para garantizar flujos y estabilidad de los equipos a las diferentes condiciones ambientales de temperatura y presión.

### 3.2.2. Descripción del sitio

El Túnel de la Loma Larga cuenta con una longitud de 532 m y está localizado al sur de Área Metropolitana de Monterrey. Este complejo atraviesa el cerro de la Loma Larga y sirve de conexión entre los municipios de Monterrey y San Pedro Garza García (Figura 4). Sirve de conexión entre algunas de las arterias viales de mayor importancia de la ciudad de Monterrey.

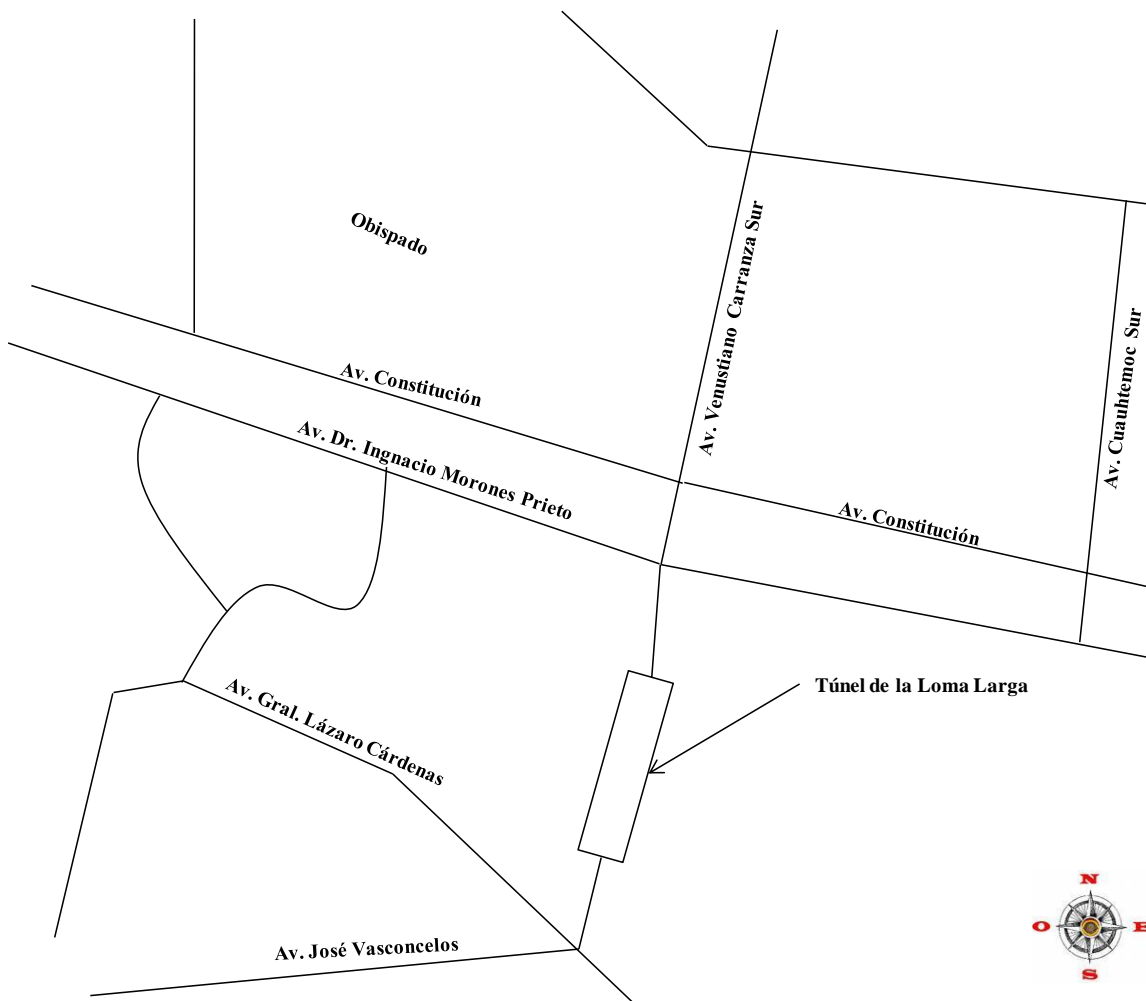


Figura 4. Ubicación del Túnel de la Loma Larga. Principales avenidas cercanas al Túnel y zonas aledañas a la Loma Larga.

La obra consta de dos “tubos” independientes, cada uno con 14 m de diámetro y 113.5 m<sup>2</sup> de área transversal, aproximadamente (Figura 5). Los tubos se encuentran interconectados mediante un acceso localizado en la mitad de la obra. Cada “tubo” cuenta con cuatro carriles, de los cuales, uno de ellos está designado para emergencias. Además, cada uno cuenta con un acceso peatonal de un 1 m de ancho, la cual permite atravesar el túnel de un extremo al otro (Figura 6).

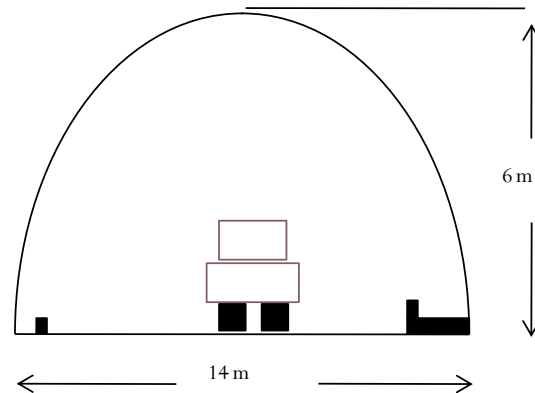


Figura 5. Dimensiones de cada una de las entradas y salidas del Túnel de la Loma Larga.

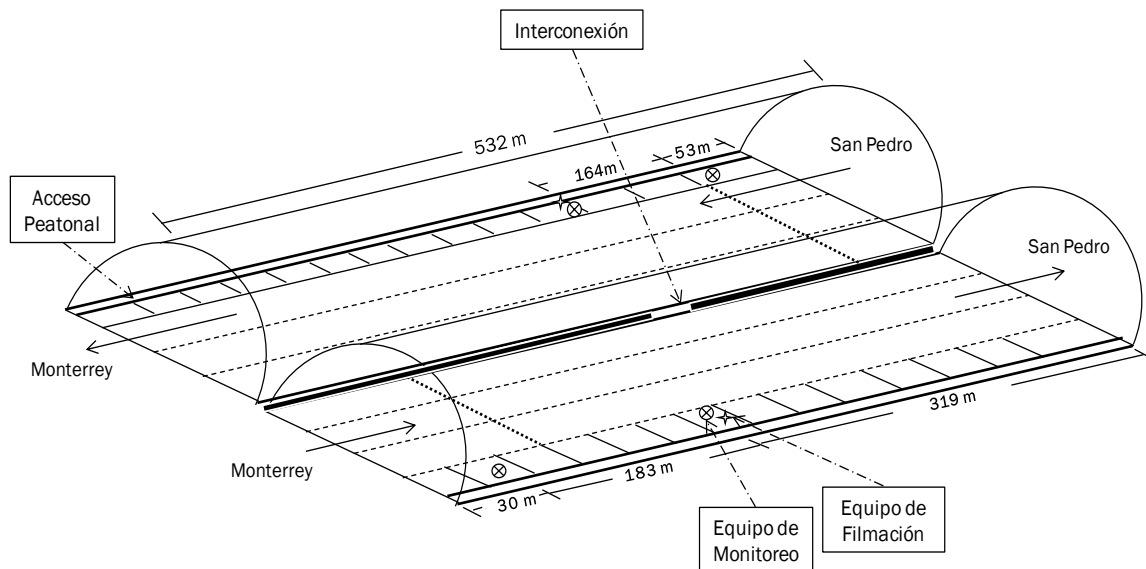


Figura 6. Bosquejo descriptivo de las características del túnel de la Loma Larga, así como de la ubicación estimada de los equipos.

Cada tubo cuenta con tres ductos de ventilación forzada localizados a lo largo del túnel. Estos ductos no estuvieron funcionando durante la realización de este proyecto. La

ventilación se debe principalmente al efecto de arrastre que ejercen los vehículos al transitar por el mismo (“efecto pistón”). El túnel presenta una ligera pendiente de norte a sur de aproximadamente +3.5% y del mismo valor en dirección contraria.

### 3.2.2 Flujo Vehicular

El flujo vehicular a través del túnel de la Loma Larga es dominado, principalmente, por vehículos a gasolina. Para un aforo realizado durante un día del mes de junio del 2007, de acuerdo con datos proporcionados (Villarreal, 2008) por el Consejo Estatal de Transporte y Viabilidad del Estado de Nuevo León (CETyV), la composición vehicular en ambos sentidos fue como se muestra en la tabla 7.

**Tabla 7.** Composición vehicular del 27 de junio del 2007 en el túnel de la Loma Larga.

Tipo de Vehículo	Sentido 1: Norte a Sur	Sentido 2: Sur a Norte	Ambos Sentidos
Automóvil Particular	68.2 %	85.9 %	77.1 %
Taxis	9.6 %	7.0 %	8.3 %
SUV	19.7 %	6.5 %	13.1 %
Autobuses	0.1 %	0.1 %	0.1 %
Camiones Diesel	2.4 %	0.5 %	1.4 %

Con la información de la tabla anterior se demuestra que los vehículos a gasolina son los que integran, en mayor proporción, las flotas vehiculares que circulan a través del túnel. Con base en ésta, en el aforo realizado en este estudio, se clasificaron los vehículos en: Sedan chico, sedan grande, SUV, taxi, motocicleta, autobús y camión de carga. Cabe mencionar que la etiqueta de “sedan chico” se refiere a vehículos compactos de 4 cilindros, mientras que “sedan grande” se refiere a automóviles de 6 u 8 cilindros.

Para determinar el número y tipo de vehículos, que transitaron durante el experimento, se colocó una cámara de video-filmación en la parte media del túnel. Se obtuvo un total de 24 videos con duración de 2.5 horas cada uno, con los cuales se realizó un aforo vehicular. Este aforo determinó la cantidad, así como la clasificación de los vehículos que entraron y salieron del túnel en cada uno de los intervalos de muestreo. Para determinar la velocidad promedio de los vehículos, se colocaron adicionalmente dos cámaras digitales, una en cada



punto de muestreo. Con los videos de ambas cámaras se determinó el tiempo que tardaba en recorrer cada vehículo la distancia entre las dos. Con el tiempo y la distancia se calcularon velocidades promedió de los vehículos.

### 3.2.3 Campaña de monitoreo

En la Figura 7 se muestra el conteo vehicular por hora que se realizó para la composición vehicular mostrada en la Tabla 7. En esta figura se observa que los intervalos de tiempo con mayor flujo vehicular ocurren entre las 7:00 y 9:00 A.M. en el sentido de norte a sur y entre las 6:00 y 8:00 P.M. en el sentido contrario. A partir de este análisis se establecieron los horarios de monitoreo de este estudio, para cada una de las corridas experimentales. Estos horarios, junto con el programa del experimento, se pueden observar en la Tabla 8.

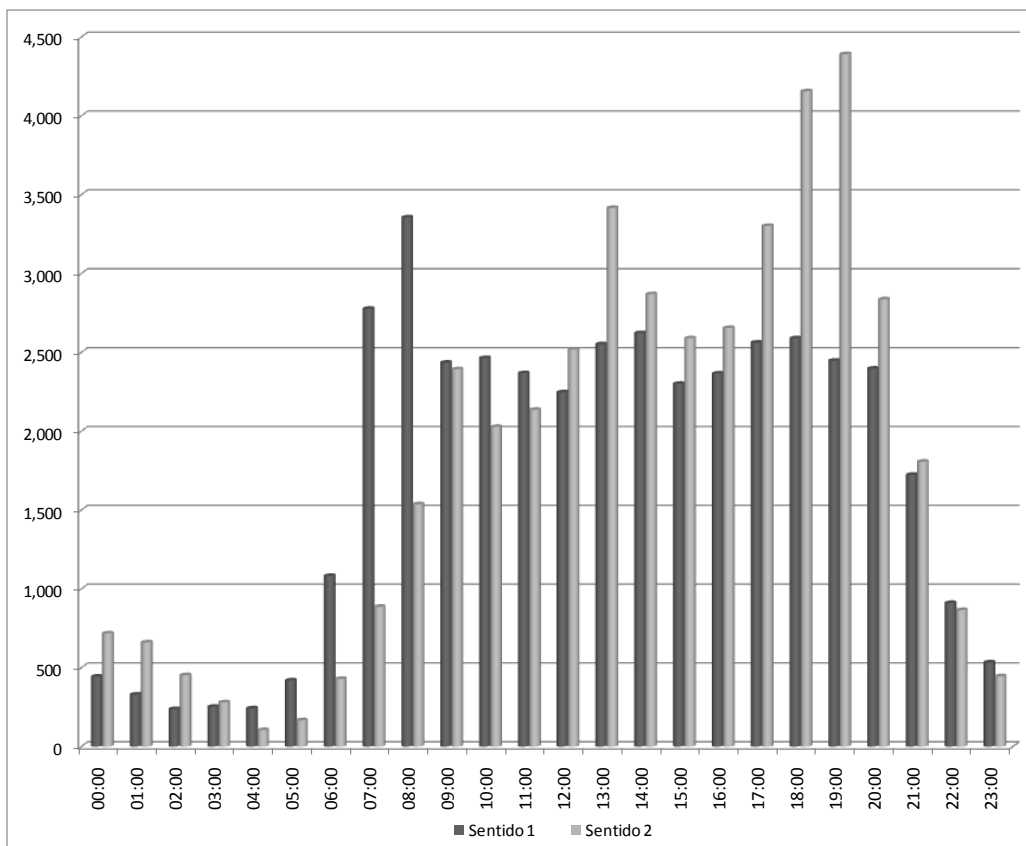


Figura 7. Aforo vehicular (vehículos/hora) en el túnel de la Loma Larga el día 27 de junio de 2007 (Villarreal, 2008). Sentido 1: norte a sur; sentido 2: sur a norte.

La campaña de monitoreo se llevó a cabo durante seis días entre el 22 y 30 de junio del 2009. Cada corrida experimental comprendió dos intervalos diarios de muestreo, cada uno

con duración de dos horas y media. Los muestreos se realizaron en un tubo a la vez, debido a las limitaciones en la cantidad de equipo disponible. Los intervalos de muestreos se llevaron a cabo en horarios de flujo vehicular alto y moderado. No se consideraron intervalos de afluencia vehicular baja debido a los flujos bajos de muestreo que se utilizaron, esto con el objetivo de recolectar material suficiente para los análisis. Se realizaron visitas previas de campo para estimar la densidad y velocidad de tráfico de los intervalos de muestreo seleccionados, con el fin de realizar los cambios pertinentes antes de la realización del experimento principal.

**Tabla 8.** Programa del experimento.

Tubo	Horario	Tráfico Vehicular	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6
			Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Lunes	Martes
			22/jun/09	23/jun/09	24/jun/09	25/jun/09	29/jun/09	30/jun/09
Sentido 1	6:45 a 9:15	Alto	√	√	√			
	10:45 a 13:15	Moderado	√	√	√			
Sentido 2	9:45 a 12:15	Moderado				√	√	√
	17:45 a 20:15	Alto				√	√	√

De acuerdo a los modelos de factores de emisión, que se describirán más adelante, es necesario cumplir con un balance de materia por contaminante, por lo que se deben colocar equipos de medición y muestreo en cada una de las entradas y salidas del túnel. Considerando que cada tubo es prácticamente independiente, y que cada uno cuenta con una sola entrada y salida, se necesitarán básicamente dos puntos de muestreo (uno a la entrada y otro a la salida de cada tubo). La ubicación exacta de cada equipo de monitoreo fue determinada mediante visitas a campo con el objeto de conocer con mayor precisión las condiciones dentro del túnel antes de llevar a cabo el experimento. Basándose en diferentes estudios (Valiulis *et al.*, 2002; Cheng *et al.*, 2006) el primer punto de muestreo se colocó a 30 m de la entrada para el sentido 1, y a 53 m para el sentido 2. El segundo punto de muestreo se ubicó en la parte media del túnel, poco antes de la interconexión, con el objeto

de prevenir pérdidas de material a través de la misma. Los muestreadores de volumen se colocaron a 2 m de altura, mientras que los anemómetros y medidores de CO<sub>2</sub> a 1.5 m (en ambos considerando la altura de la acera); todos los equipos estuvieron a 1.5 m de la pared del túnel (Figura 6). Las distancias entre ambos puntos de muestreo fueron de 183 m y 164 m para los tubos en el sentido 1 y 2, respectivamente.

En cada uno de los puntos de monitoreo se montaron los siguientes equipos: dos MiniVols para muestreo de partículas PM<sub>2.5</sub>, un equipo portátil de CO<sub>2</sub> y un anemómetro que midió las velocidades de viento. De los dos MiniVols, uno utilizó filtro de cuarzo y el otro filtro de teflón.

### 3.2.4 Blancos y polvos suspendidos

Con el objeto de obtener un valor real de la masa emitida por vehículos, las muestras se corrigieron por blancos de campo. Durante el experimento se tomaron en total cuatro blancos. Para cada tubo se tomaron dos blancos, uno con filtro de teflón y otro con filtro de cuarzo. Un mismo blanco fue usado tanto para flujo vehicular alto como moderado. En cada día en el que se utilizó un blanco, éste se colocó cierto tiempo tanto en la entrada como a mediación del túnel. La información sobre el muestreo de cada uno de los blancos se muestra en la tabla 9.

**Tabla 9.** Muestreo de blancos para cada tubo.

No. Blanco	Filtro	Día	Sentido	Tráfico Vehicular
1	Teflón	1	Norte a Sur	Alto y Moderado
2	Cuarzo	2	Norte a Sur	Alto y Moderado
3	Teflón	5	Sur a Norte	Alto y Moderado
4	Cuarzo	6	Sur a Norte	Alto y Moderado

Además de la toma de blancos se analizaron los polvos que se asentaban dentro del túnel. Estos polvos pueden resuspenderse con el movimiento de los vehículos y la velocidad del viento, ocasionando que las PM<sub>2.5</sub> provenientes de éstos pudieran ser muestreados por los equipos de bajo volumen. Para eliminar esta posible interferencia en los resultados finales, se llevó a cabo un muestreo específico de estos polvos. Por medio de un recogedor y cepillo

pequeños los polvos fueron recolectados en bolsas de plástico, etiquetados y posteriormente refrigerados. Se tomaron muestras de los polvos dentro de cada tubo y de los polvos en el exterior del túnel, en ambos extremos. Se diseñó una cámara de resuspensión de polvos con tuberías de PVC (Figura 8) a través de la cual se hicieron fluir los polvos recolectados de tal manera que un muestreador de bajo volumen tomará una muestra tanto en un filtro de teflón como de cuarzo.

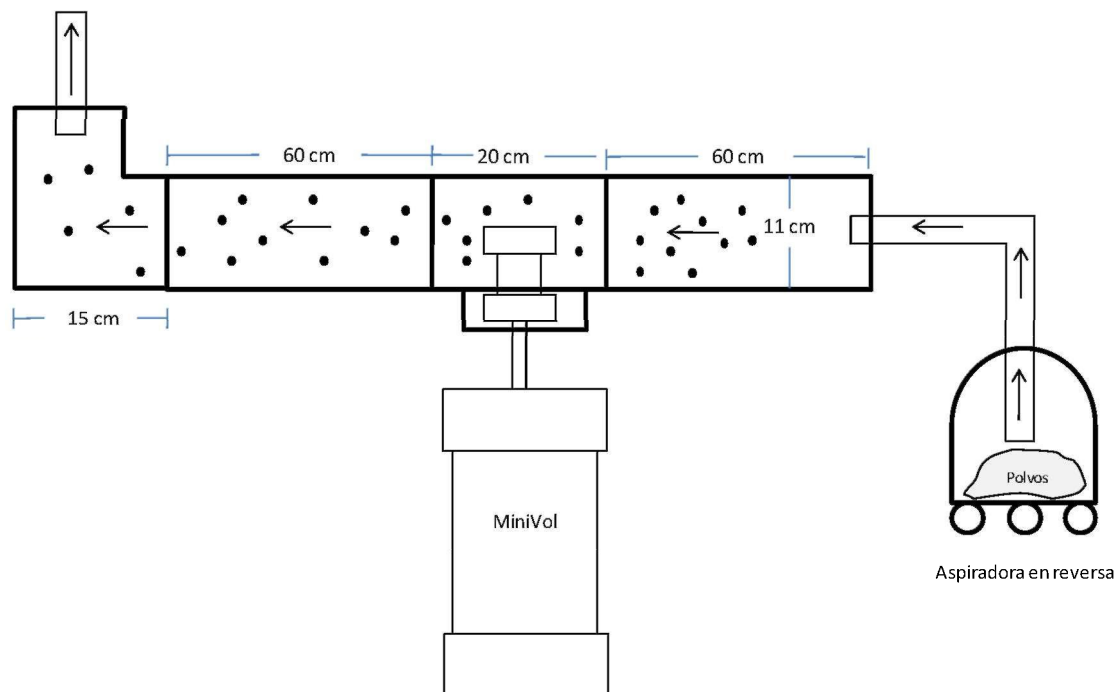


Figura 8. Cámara de resuspensión de polvos para muestreos instantáneos.

### 3.3 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

Para llevar a cabo la caracterización química de las emisiones de fuentes móviles, las muestras fueron recolectadas en dos tipos de filtros, teflón y cuarzo, a los cuales se les realizaron los siguientes análisis: a los filtros de teflón se les determinó la masa recolectada por gravimetría y 38 metales (Na al Pb) por Fluorescencia de Rayos-X (Método IO-3.3 de la US EPA), a las unidades de cuarzo se les determinó cationes ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ) y aniones ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) por cromatografía de iones, y carbón orgánico y elemental por transmitancia termo-óptica (Método 5040 del NIOSH).

En esta sección se describen cada uno de los análisis que se realizaron para la caracterización de las partículas que se describió en la sección anterior. Cabe mencionar que todos los análisis fueron realizados por un laboratorio ChesterLab, el cual encuentra localizado en Oregon, Estados Unidos.

Para garantizar la calidad de la caracterización química, fue necesario llevar un control del manejo de los filtros durante la campaña de monitoreo. Para lograrlo se identificaron cada uno de los filtros y se llevo un registro o bitácora de cada una de las muestras. Se tomaron las precauciones necesarias para evitar pérdidas de fibras que pudieran afectar en la cantidad de masa recolectada. Además se evitó la exposición de los filtros fuera del intervalo de muestreo, ya que son fáciles de contaminar y cualquier exposición puede generar variaciones en los análisis. En lo que respecta al transporte de los filtros, éstos fueron colocados en un contenedor de plástico portátil y refrigerado con una sustancia llamada “*ice blue*”, la cual mantuvo a baja temperatura las muestras durante su transportación al laboratorio.

### **3.4 ANÁLISIS QUÍMICOS**

#### **3.4.1 Gravimetría**

Esta técnica consiste en determinar la masa recolectada en cada una de las muestras. Para esto es necesario llevar a cabo un pesado de los filtros antes y después de ser utilizados. ChesterLab tomó como base el método de referencia 40 CFR (Code of Federal Regulations), apéndice L parte 50.

Este método consiste en colocar el filtro, antes de ser utilizado, en un ambiente controlado a  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $40 \pm 5\%$  de humedad relativa, por lo menos 24 horas, para llevarlo a peso constante y registrar su peso. Después de ser utilizado el filtro, se coloca bajo las mismas condiciones que antes de ser pesado y, así determinar su masa junto con la muestra recolectada. Finalmente se calcula la masa de la muestra al efectuar una diferencia entre el peso inicial y final del filtro.

### **3.4.2 Fluorescencia de Rayos X (XRF)**

Para este análisis se utilizó el protocolo del método de la EPA IO-3.3 que corresponde a la determinación de metales en la materia particulada del ambiente utilizando espectroscopia con fluorescencia de rayos X. El equipo utilizado por ChesterLab es un espectrómetro de dispersión de rayos X modelo KeveX 770.

La absorción de rayos X produce iones excitados electrónicamente que vuelven a su estado fundamental mediante transiciones que involucran a los electrones de los niveles de mayor energía. Así cuando un elemento absorbe radiación se produce un ion excitado dejando un nivel de energía como vacante; después de un breve período, el ion vuelve a su estado fundamental a través de una serie de transiciones electrónicas caracterizadas por la emisión de radiación X (fluorescencia) de longitudes de onda idénticas a las que resultaron de la excitación producida por el bombardeo de electrones. Cada elemento presenta una emisión característica de radiación (espectro) a partir de la cual se puede determinar cuantitativamente cada una de las especies presentes en una muestra de partículas.

### **3.4.3 Cromatografía de iones**

Para este análisis ChesterLab se basó en los siguientes métodos de referencia: EPA-Method 300.0 para aniones y EPA-Method 300.7 para cationes. Estos procedimientos se aplican para la determinación de aniones y cationes solubles en agua de consumo humano, aguas superficiales, aguas subterráneas, así como en aguas de tratamiento domésticas e industriales. El equipo que utiliza este laboratorio es un cromatógrafo de iones modelo Dionex DX-500.

Para llevar a cabo este análisis se extrae una muestra del filtro con agua desionizada, enseguida se filtra y posteriormente se alimenta a una fase móvil que pasa por una columna de intercambio iónico donde los iones de interés se separan. Con una fase estacionaria cargada negativamente son retenidos los cationes y viceversa, con una fase estacionaria cargada positivamente son retenidos los aniones. Finalmente los iones de interés se detectan por medio de una celda de conductividad.

### **3.4.4 Transmitancia Óptica Térmica**

Para esta técnica el laboratorio ChesterLab aplicó el método de referencia de la NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health), NIOSH-5040 Method, para la determinación de carbón orgánico y elemental en muestras de PM<sub>2.5</sub>.

En este protocolo la transmitancia es utilizada a bajas temperaturas (menores a 550°C) para determinar el carbón orgánico descompuesto debido al calor inducido al elevar la temperatura del medio. Posteriormente se debe volatilizar el carbón orgánico presente en la muestra. Para esto se incrementa constantemente la temperatura hasta alcanzar un valor de 550°C. El carbón elemental se convierte en metano a partir de temperaturas de 420°C. En un rango de 550°C a 800°C el carbón elemental, ya convertido en metano, hace combustión y es cuantificado mediante un detector de ionización de flama (FID).

### **3.5. FACTORES DE EMISIÓN**

Un factor de emisión se define como un valor representativo que intenta relacionar la cantidad de un contaminante emitido a la atmósfera con una actividad asociada con la emisión de esa sustancia (EPA-2009). Estos factores usualmente son expresados como la masa de contaminante dividido por una unidad de masa, volumen, distancia o duración de la actividad emisora. En este estudio se determinaron factores de emisión por kilómetro recorrido y por masa de combustible consumido. Estos factores de emisión se describen a continuación.

#### **3.5.1 Factores de emisión: distancia recorrida**

Una de las técnicas que se utilizó para calcular los factores de emisión de partículas (PM<sub>2.5</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) se basa en un balance de materia de cada componente emitido en el interior del túnel (Pierson *et al.*, 1996) de tal manera que la diferencia entre la masa de cada componente que sale del túnel y la que entra es igual a la masa emitida dentro del mismo. Por lo tanto, es posible estimar la razón de emisión de cada contaminante, en unidades de masa emitida por vehículo por unidad de distancia, mediante la expresión (Gillies *et al.*, 2001):

$$E = \frac{\left[ \sum_i (C_s V_s)_i - \sum_j (C_e V_e)_j \right]}{N \cdot L} \quad (1)$$

donde  $C_e$  y  $C_s$  representan las concentraciones en la entrada y salida del túnel respectivamente. En este caso los subíndices  $i$  y  $j$  tienen un valor de uno, ya que el túnel cuenta con una sola entrada y salida. Además  $V$  representa el volumen de aire que entra o abandona el túnel,  $N$  el número de vehículos y  $L$  es la distancia recorrida entre los puntos de muestreo.

### 3.5.2 Factores de emisión: combustible consumido

Otra técnica utilizada para determinar factores de emisión consiste en un balance de carbón elemental (Martins *et al.*, 2006) a partir de mediciones de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  y carbón proveniente de compuestos orgánicos no metánicos (TNMOC). Este método considera que el combustible se oxida completamente a  $\text{CO}_2$ , parcialmente a  $\text{CO}$  o simplemente no reacciona:

$$E_k' = \left( \frac{\Delta C_k}{\Delta C_{\text{CO}_2} + \Delta C_{\text{CO}} + \Delta C_{\text{TNMOC}}} \right) \cdot w_c \quad (2)$$

donde,  $\Delta C_k$  es la diferencia entre las concentraciones del componente,  $k$ , entre los dos puntos de muestreos dentro del túnel. De manera similar,  $\Delta C_{\text{CO}_2}$  y  $\Delta C_{\text{CO}}$  son la diferencia entre las concentraciones de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CO}$  respectivamente. El  $\Delta C_{\text{TNMOC}}$  representa la diferencia entre el carbón equivalente de compuestos orgánicos medido en la entrada y salida del túnel. El  $\Delta C_{\text{CO}_2}$  se obtuvo de datos de este trabajo, mientras el  $\Delta C_{\text{TNMOC}}$  y  $\Delta C_{\text{CO}}$  fueron tomados de otro estudio que se realizó en paralelo al aquí descrito (Araizaga, 2009). En este modelo también se puede incluir la contribución del carbón contenido en las  $\text{PM}_{2.5}$ , sin embargo esta contribución en este estudio fue muy baja, por lo que fue descartada. Además,  $w_c$ , representa la fracción másica de carbón en el combustible. Para el cálculo de este valor se consideró una fórmula molecular promedio de la gasolina de  $\text{C}_8\text{H}_{18}$ .



Con el modelo representado por la ecuación 2, es posible obtener una estimación de la emisión en unidades de masa de contaminante emitido por unidad de combustible quemado (por ejemplo “g/L”). En este estudio se utilizó para la gasolina una densidad de 740 g/l, un peso molecular de 114 g/mol y una fracción másica de carbón de 0.84 (Schifter *et al.*, 2000). Éste último valor no es muy diferente al utilizado en otros estudios como Kirchstetter *et al.*, 1999 donde utilizan un valor de 0.85. Además, para los TNMHC se utilizó un peso molecular aproximado de 92 g/mol (Riciardelli, 2006).

### **3.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

Una vez que se tuvieron los resultados del laboratorio se realizó un análisis estadístico para describir el comportamiento los datos obtenidos y, así realizar las conclusiones más apropiadas. Para el dióxido de carbono y la materia particulada se calcularon los estadísticos fundamentales de media y desviación estándar para describir la tendencia y variabilidad de los datos.

En el caso del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el objetivo fue determinar si los factores de emisión obtenidos provenían de una misma población vehicular y a la vez, verificar si existía diferencia entre las emisiones de ambos tubos del túnel. Para esto se realizó un análisis de varianza para estimar si existía diferencia significativa entre las medias de las muestras. Para las PM<sub>2.5</sub> se correlaciono el carbón orgánico con el carbón elemental, los cuales guardan una dependencia característica en las emisiones generadas por fuentes móviles (Watson y Chow, 2001).

Además se determinó la relación entre los factores de emisión y la velocidad promedio de la flota vehicular. Se realizó un análisis de contribución de especies a la masa total recolectada y se correlacionaron los factores de emisión de CO<sub>2</sub> con respecto a los de PM<sub>2.5</sub>, con el objeto de descartar si existe o no una dependencia directa entre ambos.

## CAPÍTULO 4

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en este estudio, así como la discusión de cada uno de ellos. Se presentan:

- Los resultados obtenidos para los parámetros fundamentales en el cálculo de factores de emisión: velocidades de viento, conteo y composición de vehículos y velocidades promedio del tráfico vehicular.
- Factores de emisión por kilómetro recorrido y combustible consumido para CO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub>.
- Rendimiento y consumo de fuentes vehiculares.
- Perfiles de concentración de CO<sub>2</sub> en función del tiempo, su dependencia con respecto a la velocidad vehicular y un análisis estadístico apropiado.
- Factores de emisión totales para PM<sub>2.5</sub>.
- Factores de emisión para PM<sub>2.5</sub> por especie química, así como los perfiles de contribución de cada una de ellas.
- La correlación entre el carbón orgánico y elemental.
- Estimación del inventario de emisiones de fuentes móviles en el AMM para vehículos de pasajeros y taxis.

#### 4.1. TÚNEL

En esta sección se explican los resultados obtenidos de los parámetros básicos que son necesarios para la estimación de factores de emisión. Estos parámetros son requeridos por los modelos que se describieron en la sección de metodología, y consisten en:

- ◆ Velocidades de viento.
- ◆ Número de vehículos.
- ◆ Composición de flota vehicular.
- ◆ Velocidad de vehículos.
- ◆ Concentraciones de TNMHC, CO<sub>2</sub> y CO.

#### 4.1.1. Flujo de aire

Para determinar el flujo volumétrico de aire se tomaron mediciones de las velocidades de viento en la entrada y a mediación del túnel. En la Tabla 10 se pueden observar los valores obtenidos. Las velocidades de viento promedio para un tráfico alto y moderado fueron de 2.02 m/s y 2.27 m/s, respectivamente. La velocidad de viento está influenciada directamente por la velocidad de los vehículos que atraviesan el túnel. Para un tráfico alto y moderado la velocidad vehicular promedio fue de 48 km/hr y 59 km/hr, respectivamente.

**Tabla 10.** Velocidades de viento promedio de cada tubo del túnel de la Loma Larga.

Fecha	Sentido	Tráfico Vehicular: Alto V (m/s)	Tráfico Vehicular: Moderado V (m/s)
22-jun-09	1	2.01	2.18
23-jun-09	1	1.87	2.62
24-jun-09	1	2.04	2.75
25-jun-09	2	1.58	2.12
29-jun-09	2	2.48	1.72
30-jun-09	2	2.15	2.23

<sup>a</sup> Sentido 1: Monterrey a San Pedro; sentido 2: San Pedro a Monterrey.

Con los valores de la Tabla 10 y el área transversal de cada tubo se calculó el flujo volumétrico de aire. Es conveniente apuntar que estos flujos no están influenciados directamente por la temperatura ya que se calcularon a partir de la velocidad de viento medida por el anemómetro y no del flujo másico de aire, donde se requeriría la densidad, la cual si se ve afectada por la temperatura. Los flujos volumétricos de aire obtenidos se muestran en la Tabla 11.

**Tabla 11.** Flujos Volumétricos de aire muestreados en cada tubo del Túnel de la Loma Larga.

Fecha	Sentido	Tráfico Vehicular: Alto Q (m <sup>3</sup> /s)	Tráfico Vehicular: Moderado Q (m <sup>3</sup> /s)
22-jun-09	1	228	247
23-jun-09	1	212	297
24-jun-09	1	232	312
25-jun-09	2	179	241
29-jun-09	2	281	195
30-jun-09	2	244	253

Al igual que las velocidades de viento, el flujo volumétrico de aire fue mayor para un tráfico vehicular alto que moderado, obteniéndose valores promedio de 229 m<sup>3</sup>/s y 258 m<sup>3</sup>/s, respectivamente. Los flujos de la Tabla 11 son los utilizados en el cálculo de los factores de emisión, a partir de uno de los modelos planteados en la sección de metodología.

Es importante aclarar que los flujos, de la Tabla 11, no corresponden al muestreo por los equipos de bajo volumen (MiniVol). El flujo de estos equipos sirvió para determinar la concentración de PM<sub>2.5</sub>. El flujo muestreado por estos equipos estuvo afectado directamente por la temperatura promedio dentro del túnel, ya que para la calibración de éstos la temperatura era requerida.

En este experimento se registraron, dentro del túnel, valores promedio de temperatura de 22.5 °C, presión 715.4 mm Hg, humedad relativa 43.3% y una densidad del aire de 1.11 kg/m<sup>3</sup>.

#### **4.1.2. Aforo Vehicular**

A partir de los videos de filmación se estimó la composición y el número de vehículos en cada uno de los intervalos de muestreo. La composición vehicular obtenida para ambos sentidos del Túnel se muestra en las Figura 9. En esta figura podemos observar que el tráfico vehicular, en el túnel de la Loma Larga, está dominado por vehículos de pasajeros a base de gasolina. De acuerdo a los resultados, estos vehículos (sedan chico, sedan grande, SUV, taxis y pick up) constituyen aproximadamente el 97% de la flota vehicular que transita a través del túnel. Si comparamos este valor con el obtenido en el aforo realizado por el CET y V en el 2007 (Figura 10), podemos notar que existe una variación del 1.5%., por lo que no existe una diferencia significativa en la composición vehicular del Túnel de la Loma Larga con respecto al tiempo.

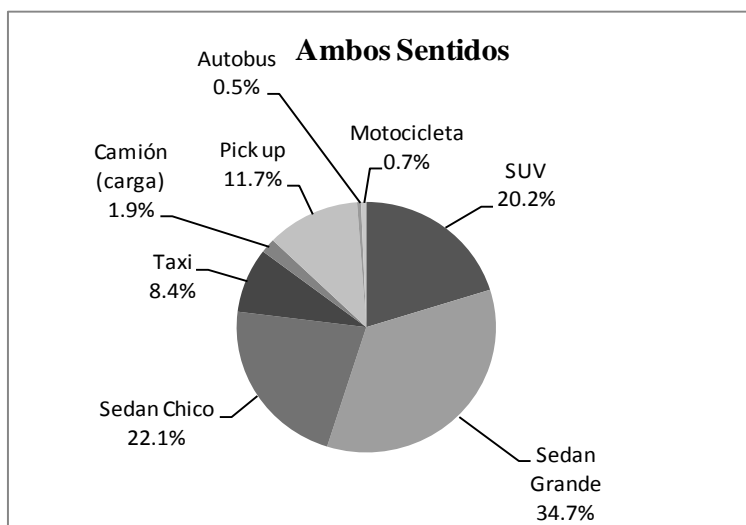
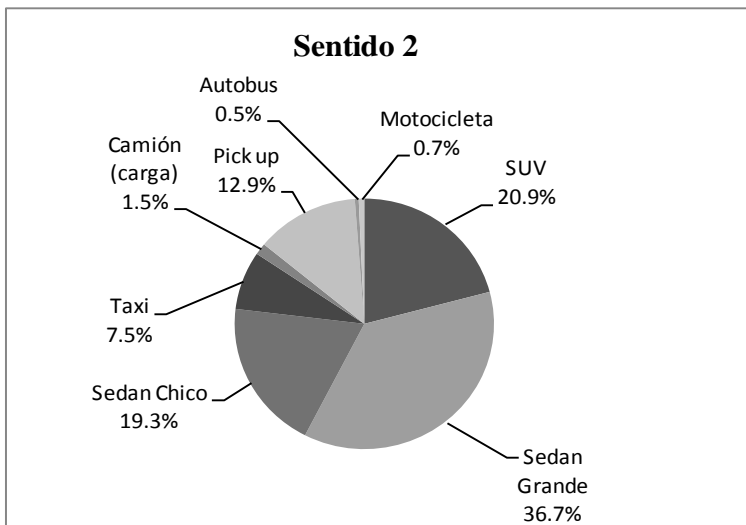
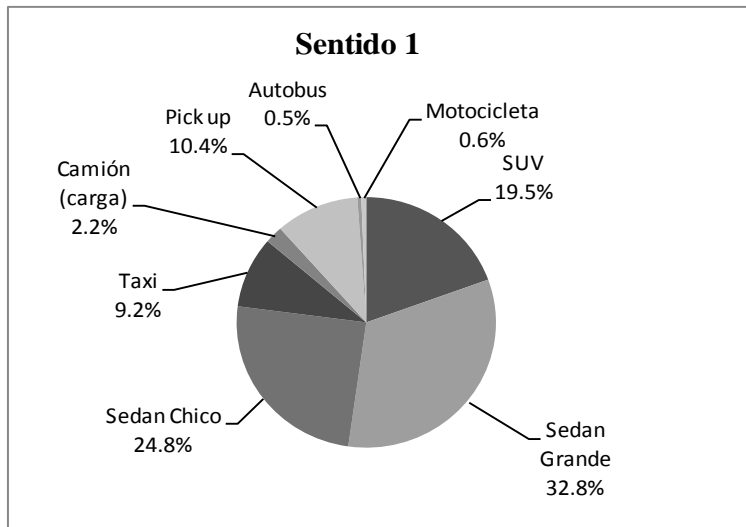


Figura 9. Composición vehicular del Túnel de la Loma Larga.

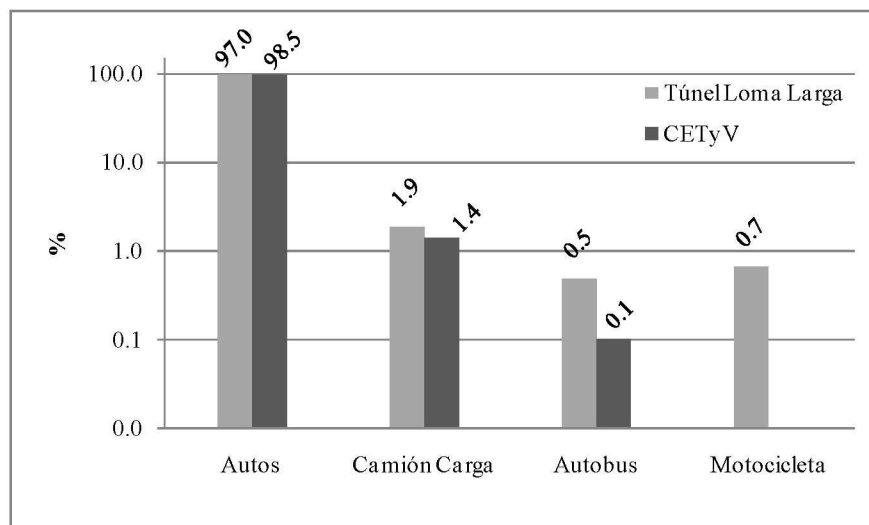


Figura 10. Comparación de la composición vehicular del Túnel de la Loma Larga.

El número de vehículos muestreados durante cada período de la campaña se listan en la Tabla 12. Si también se comparan estos resultados con los equivalentes en el aforo realizado en 2007 (presentes en la Tabla 12), podemos observar que existe un incremento en la cantidad de vehículos de este estudio. Estos incrementos fueron: para un tráfico vehicular alto, de  $23.5 \pm 15.1\%$  para el sentido 1 y de  $2.1 \pm 1.9\%$  para el sentido 2; para un tráfico vehicular moderado, de un  $44.4 \pm 12.9\%$  para el sentido 1 y de  $49.1 \pm 5.3\%$  para el sentido 2. En este estudio se calculó una cantidad total aproximada de 108,569 vehículos muestreados, de los cuales el 54% y 46% corresponden a un flujo vehicular alto y moderado respectivamente.

Tabla 12. Cantidad total de vehículos muestreados durante cada muestreo.

Tráfico Vehicular						
Corrida Experimental	Día	Fecha	Este Estudio		Villarreal, 2008	
			Alto	Moderado	Alto	Moderado
1	Lunes	22-jun-09	7,739	7,725		
2	Martes	23-jun-09	9,893	9,235	7,142 <sup>a</sup>	5,875 <sup>a</sup>
3	Miércoles	24-jun-09	9,320	9,234		
4	Jueves	25-jun-09	10,380	7,837		
5	Lunes	29-jun-09	10,766	7,613	10,359 <sup>b</sup>	5,294 <sup>b</sup>
6	Martes	30-jun-09	10,658	8,169		

<sup>a</sup> Cantidad de vehículos en el sentido 1: Monterrey a San Pedro.

<sup>b</sup> Cantidad de vehículos en el sentido 2: San Pedro a Monterrey.

Además del aforo vehicular, se estimó la velocidad promedio de los vehículos. Se obtuvieron valores promedio de  $48 \pm 3$  km/hr y  $59 \pm 13$  km/hr para tráfico alto y moderado respectivamente. En la Figura 11 podemos observar que todos los días de muestreo la velocidad vehicular para un tráfico alto fue menor que para un tráfico moderado. Lo anterior con excepción del día 24 de junio, porque en ese día no se presentó un congestionamiento tan estático como el de los demás. Por lo que los vehículos estuvieron igualmente distribuidos que durante el tráfico moderado, durante el tiempo de muestreo.

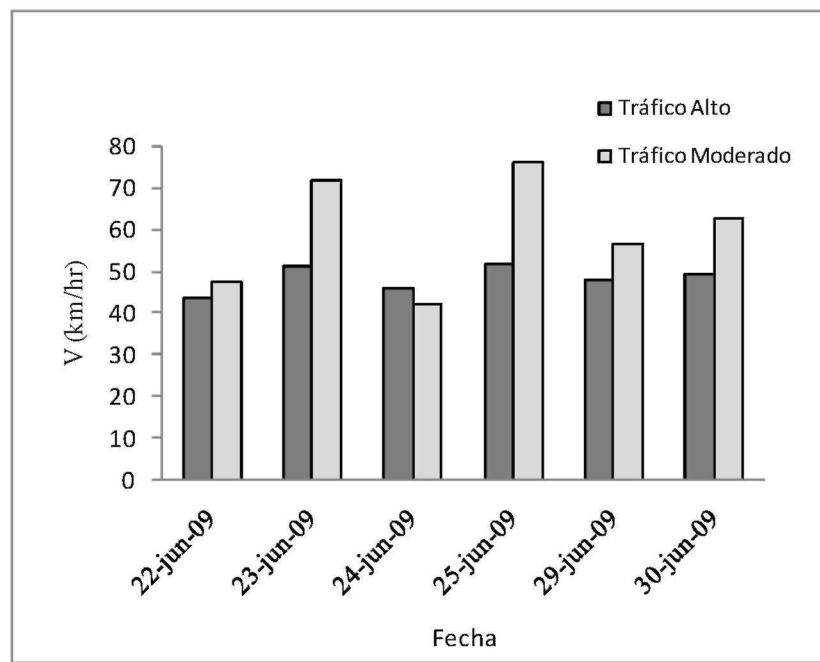


Figura 11. Velocidad vehicular en el Túnel de la Loma Larga.

## 4.2. FACTORES DE EMISIÓN DE CO<sub>2</sub>

Las concentraciones de dióxido de carbono, en partes por millón (ppm), fueron registradas cada minuto durante las 2.5 horas que duró cada intervalo de muestreo. Los comportamientos de concentración de CO<sub>2</sub> en la entrada y a mediación del túnel, durante cada corrida, se muestran en las figuras 12 a la 15. En estas figuras podemos observar el comportamiento esperado, el cual consistía en que las concentraciones dentro del túnel fueran más elevadas que en la entrada. Para el cálculo de los factores se utilizó la densidad del aire a las condiciones de temperatura y presión de cada monitoreo.

### 4.2.1. Factores de emisión: kilómetro recorrido.

Los factores de emisión por kilómetro recorrido que se obtuvieron se muestran en la Tabla 13. Para la corrida 5 se obtuvieron valores negativos, por lo que fueron descartados. En las gráficas correspondientes a esta corrida (Figura 13 y 14), podemos observar que en algunos instantes, durante el monitoreo, las concentraciones en la entrada fueron mayores que en el punto medio del túnel, generando cambios de concentración negativos. Esto se atribuye a que en la entrada del túnel existe una reducción de carriles, lo que generó un mayor estancamiento vehicular que en la salida. En la corrida 4 también se obtuvieron cambios de concentración negativos, durante el muestreo de tráfico alto, lo cual generó un factor de emisión relativamente pequeño. Este valor fue también descartado, al ser su incertidumbre mucho mayor que el factor de emisión.

**Tabla 13.** Factores de emisión de CO<sub>2</sub> por kilómetro recorrido.

Factores de emisión de CO <sub>2</sub> en g-veh <sup>-1</sup> km <sup>-1</sup> )				
Corrida	Fecha	Tráfico Alto	Tráfico Moderado	Sentido <sup>a</sup>
1	22-jun-09	195 ± 62	192 ± 49	
2	23-jun-09	154 ± 55	179 ± 41	1
3	24-jun-09	183 ± 58	227 ± 53	
4	25-jun-09	V.D. <sup>b</sup>	149 ± 37	
5	29-jun-09	V.D. <sup>b</sup>	V.D. <sup>b</sup>	2
6	30-jun-09	146 ± 34	161 ± 41	

<sup>a</sup> Sentido 1: Monterrey a San Pedro; sentido 2: San Pedro a Monterrey.

<sup>b</sup> Valor Descartado. Por ser negativo y tener incertidumbre demasiado grande.



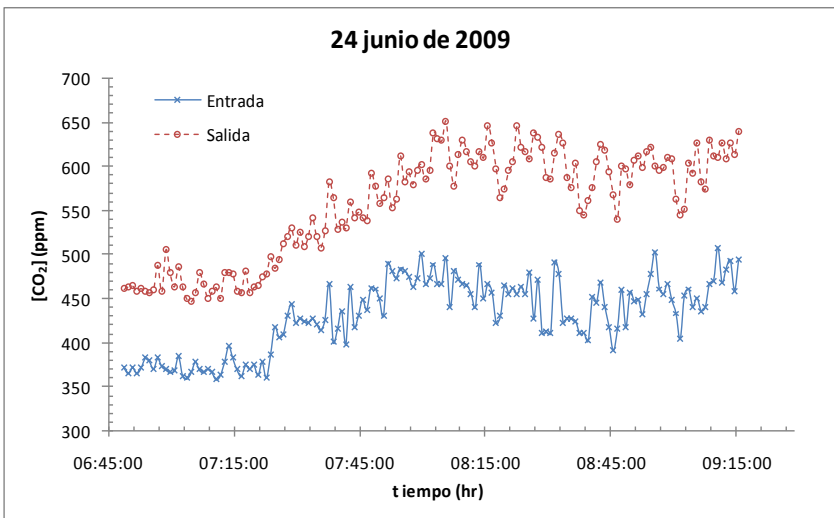
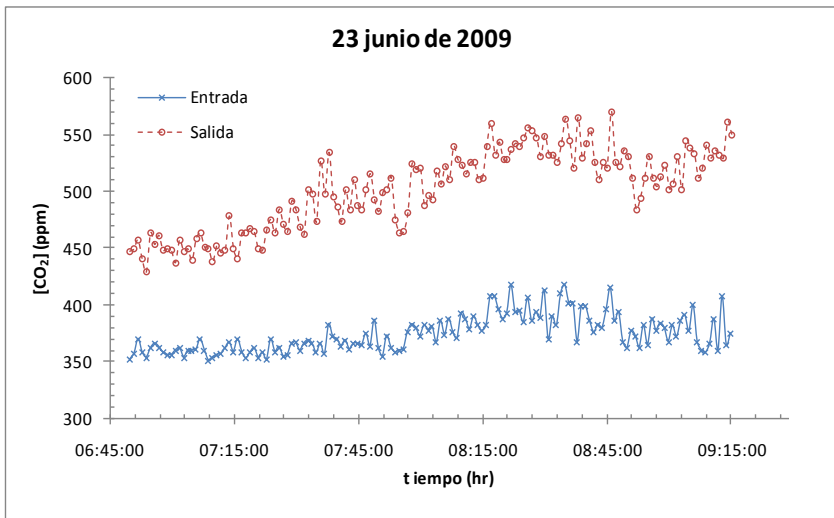
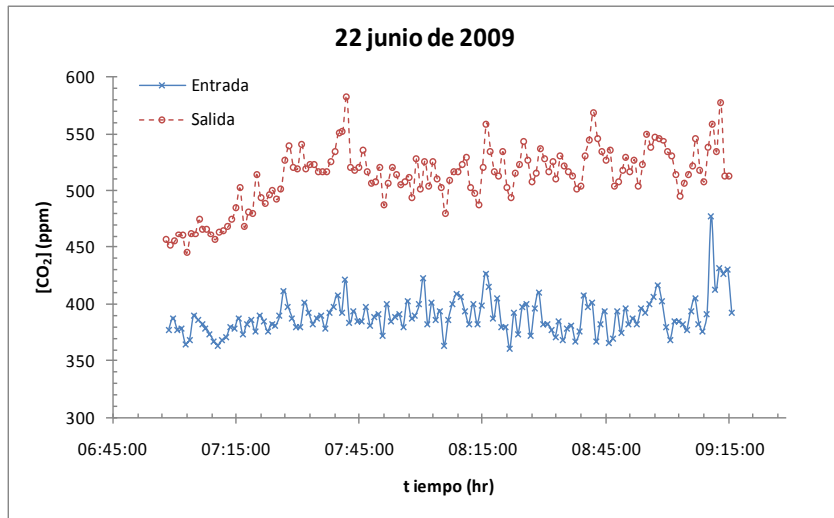


Figura 12. Concentraciones de CO<sub>2</sub> en el sentido 1 (Monterrey a San Pedro), durante una densidad de tráfico alto.

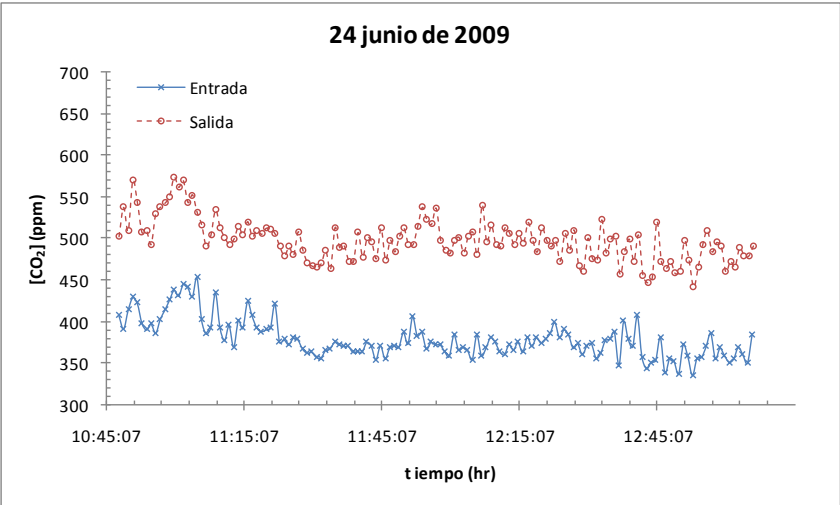
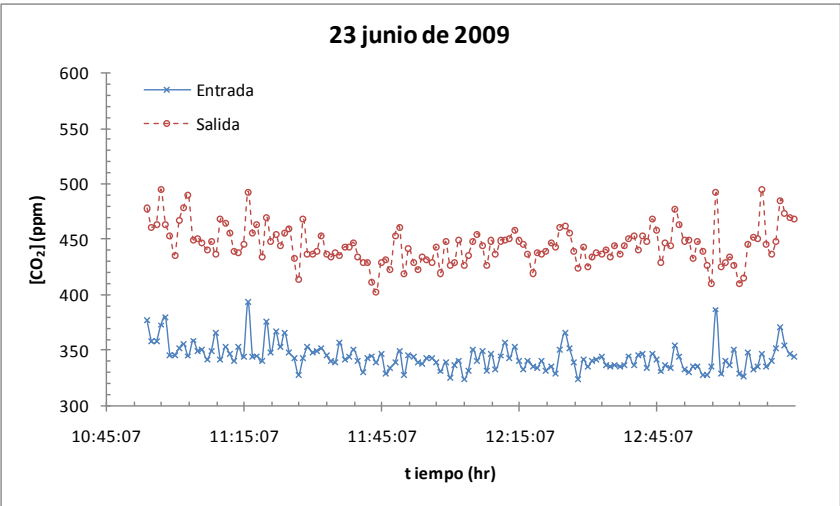
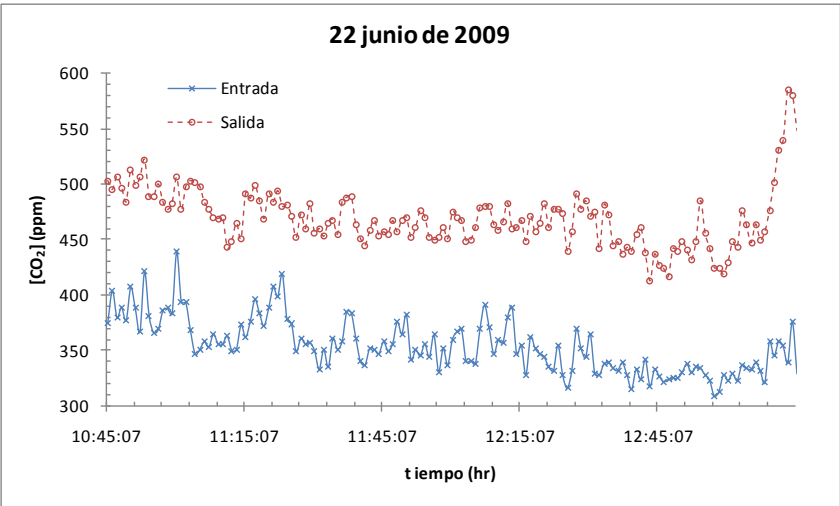


Figura 13. Concentraciones de CO<sub>2</sub> en el sentido 1 (Monterrey a San Pedro), durante una densidad de tráfico moderado.

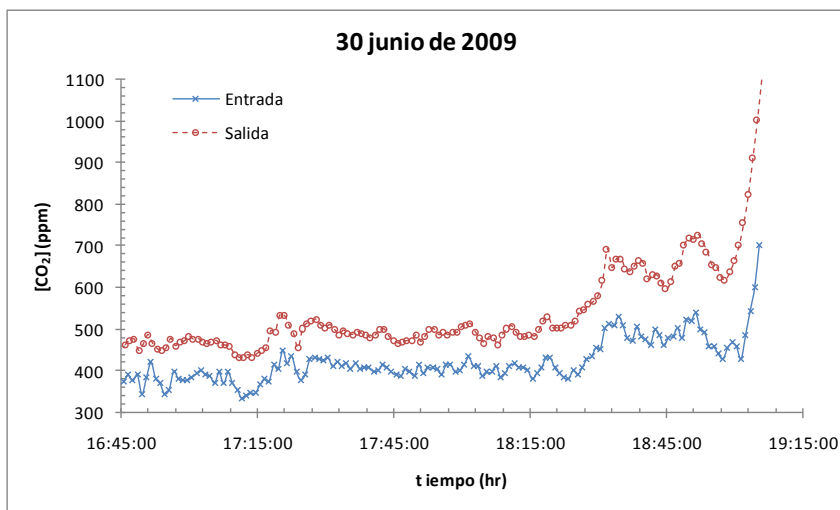
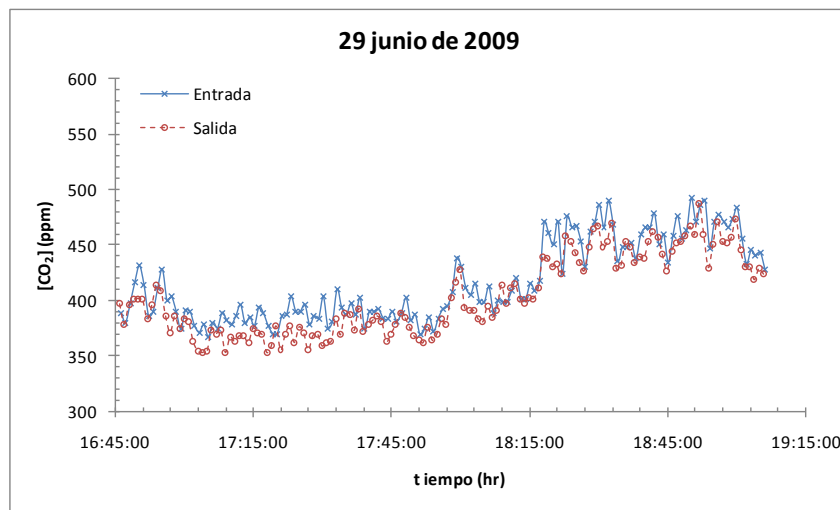
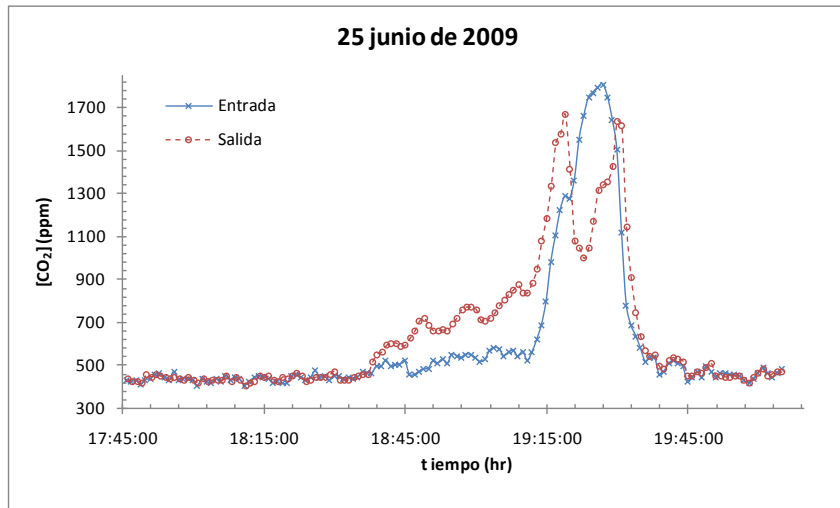


Figura 14. Concentraciones de CO<sub>2</sub> en el sentido 2 (San Pedro a Monterrey), durante una densidad de tráfico alto.

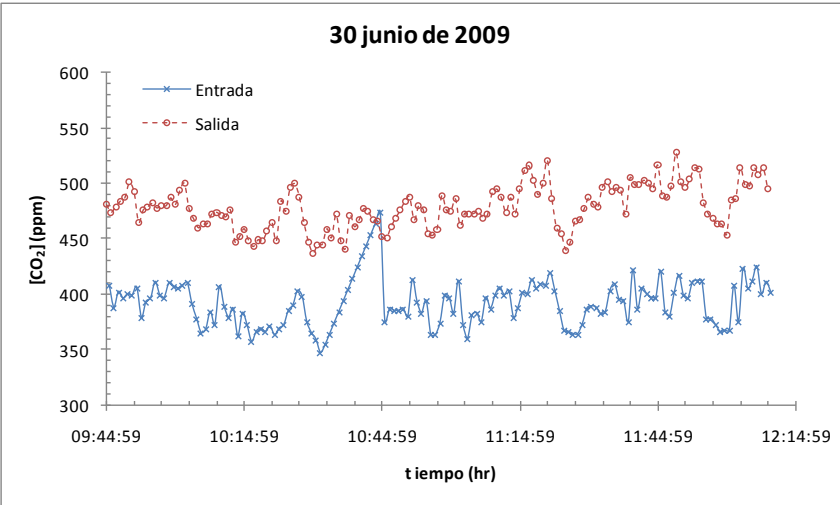
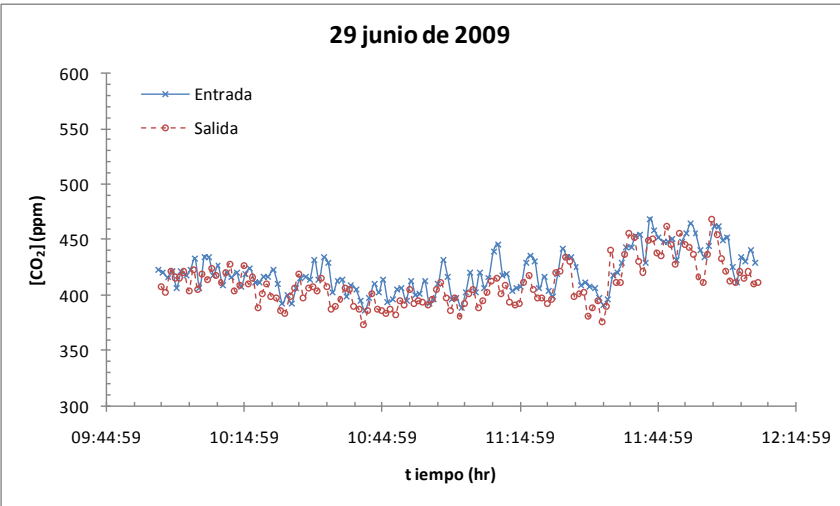
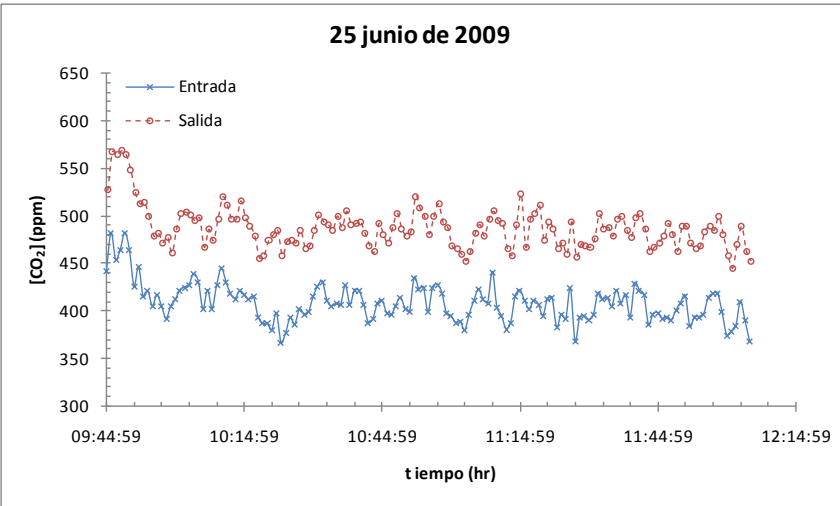


Figura 15. Concentraciones de CO<sub>2</sub> en el sentido 2 (San Pedro a Monterrey), durante una densidad de tráfico moderado.

En la Tabla 14 se comparan los factores de emisión de este estudio (Tabla 13) con los obtenidos en los túneles de *Fort McHenry* en Baltimore, *Tuscarora* en Pennsylvania (Pierson *et al.*, 1996), ambos localizados en Estados Unidos, y *Gelezinis Vilkas* en Vilnius, Lituania (Valiulis *et al.*, 2002). Los factores de emisión de estos túneles corresponden a vehículos de trabajo ligero (LD). Los valores obtenidos en el Túnel de la Loma Larga estuvieron de acuerdo con los resultados de estos túneles.

**Tabla 14.** Comparación de factores de emisión de CO<sub>2</sub> (g-veh<sup>-1</sup>-km<sup>-1</sup>): efecto de la pendiente.

Fort McHenry		Tuscarora	Loma Larga <sup>a</sup>		Gelezinis Vilkas
Pendiente abajo (-1.8%)	Pendiente arriba (+3.3%)	Plano	Pendiente abajo (-3.5%)	Pendiente arriba (+3.5%)	Plano
147 ± 6	230 ± 20	144 ± 7	152 ± 22	188 ± 22	128±11

<sup>a</sup> Factores de emisión promedio; se promediaron los resultados obtenidos en la tabla 13.

Las emisiones de CO<sub>2</sub> de un vehículo que se mueve pendiente arriba son mayores que las emisiones de un vehículo que se mueve pendiente abajo. Cuando vehículo se mueve pendiente arriba acelera constantemente, lo que implica un mayor consumo de combustible y, por lo tanto en una mayor generación de emisiones.

#### 4.2.2. Factores de emisión: combustible consumido.

Los factores de emisión por combustible consumido correspondientes al Túnel de la Loma Larga se presentan en la Tabla 15. A partir de los resultados, en ambos sentidos, podemos observar que no existe un efecto significativo de la pendiente (cuesta arriba y cuesta abajo) del túnel sobre la cantidad de CO<sub>2</sub> generado en función del volumen de combustible consumido por los vehículos. En estudios similares como Pierson *et al.*, 1996, sucede de la misma manera. En la Tabla 16 se muestra una comparación con los resultados obtenidos en otros túneles y con el resultado determinado por la USEPA.

**Tabla 15.** Factores de emisión del CO<sub>2</sub> por combustible consumido.

Corrida	Fecha	Tráfico Alto (g/L)	Tráfico Moderado (g/L)	Sentido
1	22-jun-09	2,024 ± 54	1,973 ± 50	1
2	23-jun-09	2,064 ± 44	1,957 ± 38	
3	24-jun-09	2,013 ± 62	2,044 ± 32	
4	25-jun-09	V.D. <sup>a</sup>	2,115 ± 21	2
5	29-jun-09	V.D. <sup>a</sup>	V.D. <sup>a</sup>	
6	30-jun-09	2,067 ± 72	1,953 ± 652	

<sup>a</sup> Valor descartado por tener incertidumbres demasiado grandes.

**Tabla 16.** Comparación de factores de emisión (g/L): efecto de la pendiente.

Fort McHenry		Tuscarora	Loma Larga <sup>b</sup>		EPA <sup>a</sup>
Pendiente abajo (-1.8%)	Pendiente arriba (+3.3%)	Plano	Pendiente abajo (-3.5%)	Pendiente arriba (+3.5%)	Plano
2,211 ± 120	2,199 ± 263	2,217 ± 157	2,045 ± 219	2,012 ± 20	2,268

<sup>a</sup>EPA420-F-05-001; <sup>b</sup> Factores de emisión promedio; se promediaron los resultados obtenidos en la tabla 15.

#### 4.2.3. Rendimiento vehicular

Considerando los factores de emisión pendiente arriba como los más representativos (como ya se menciona), se calculó el rendimiento promedio por vehículo. Se utilizan los factores de CO<sub>2</sub> (por kilómetro recorrido y combustible consumido) para realizar este cálculo, ya que, el 99% del carbón de cualquier combustible derivado del petróleo es oxidado a CO<sub>2</sub> (EPA, 2005). El rendimiento obtenido fue de 10.70 km/L, el cual es similar al valor de 10.2 km/L que reporta la EPA (EPA, 2005). Por lo tanto, podemos afirmar que el valor aquí calculado es coherente.

#### 4.2.4. Efecto de la velocidad vehicular

Otro factor importante que se analizó fue la influencia que tiene la velocidad de los vehículos sobre las emisiones de CO<sub>2</sub>. De acuerdo a los resultados mostrados en la Figura 16 podemos decir que a una mayor velocidad las emisiones de CO<sub>2</sub> serán menores. En este estudio se encontró que estas variables presentan un coeficiente de correlación de *Pearson*, *r*, de 0.739, lo que indica que existe una “no despreciable” relación causa-efecto entre la velocidad y las emisiones de CO<sub>2</sub>.

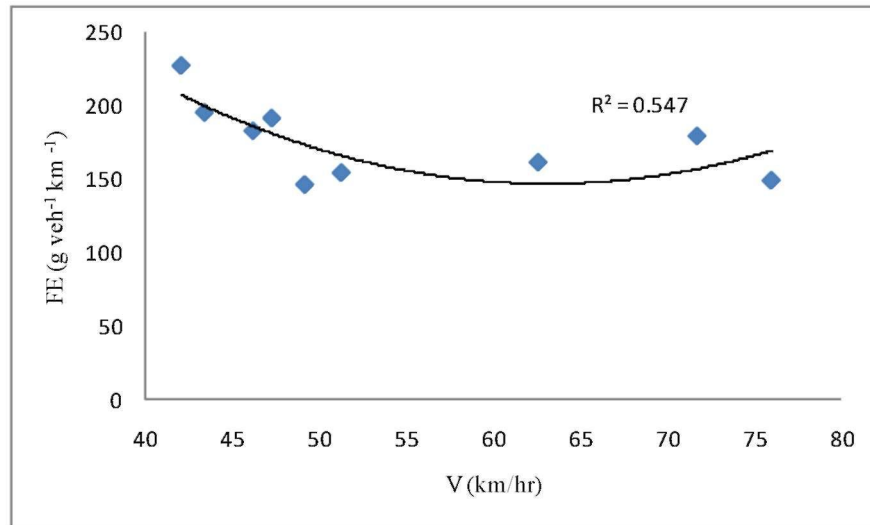


Figura 16. Influencia de la velocidad vehicular sobre los factores de emisión de CO<sub>2</sub>.

La correlación existente nos permite obtener un modelo de regresión para estimar los factores de emisión de CO<sub>2</sub> en función de la velocidad vehicular. Sin embargo, este modelo explicaría solo el 54.7% ( $r^2 = 0.547$ ) de la variación total de los valores de FE<sub>CO<sub>2</sub></sub>. El modelo cuadrático sería:

$$FE_{CO_2} = 0.1375 \cdot V^2 - 17.35 \cdot V + 639.88 \quad (3)$$

donde  $V$  sería la velocidad de la fuente móvil en km/hr y  $FE$  el factor de emisión de CO<sub>2</sub> en g-veh<sup>-1</sup>-km<sup>-1</sup>. Es importante señalar que este modelo es válido para el rango de velocidades promedio registradas en este estudio, el cual fue de 43 km/hr a 76 km/hr. Se ha demostrado en otros estudios que es posible alcanzar hasta una reducción del 48% de las emisiones de CO<sub>2</sub> si los vehículos se desplazarán a altas velocidades (Beever y Carslaw, 2005). De acuerdo con el modelo de regresión propuesto en este estudio, es posible lograr reducciones del 17.7% de las emisiones generadas por fuentes móviles en el AMM.

#### 4.2.5. Análisis Estadístico

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para comparar si los factores de emisión promedios, entre el sentido 1 y 2, son significativamente diferentes. Para los factores de emisión por kilómetro recorrido se obtuvo un valor  $F$  de 2.69 y un valor  $p$  de 0.16, mientras que para los factores por combustible consumido se obtuvo un valor  $F$  de 0.45 y un valor  $p$

de 0.66. Considerando un nivel de significancia del 5% se tiene un valor crítico de  $F = 5.79$ . Como los valores de  $F$  son menores al valor crítico, podemos concluir que no existe diferencia significativa entre los factores de emisión calculados en ambos sentidos. Por lo tanto podemos afirmar que las emisiones de cada uno de los tubos del túnel provienen de la misma población de vehículos, representativa del AMM. Lo anterior es válido para ambos tipos de factores de emisión.



### 4.3. EMISIONES DE PM<sub>2.5</sub>

Los factores de emisión para PM<sub>2.5</sub> fueron corregidos por el promedio de los blancos tomados en cada tubo y por los polvos que presentaban la tendencia a ser resuspendidos. Estos resultados se presentan en las Tablas 17 y 18, respectivamente.

**Tabla 17.** Factores de emisión de PM<sub>2.5</sub> por kilómetro recorrido.

Factores de emisión en mg/km-veh					
Corrida	Fecha	Tráfico Alto		Tráfico Moderado	
		Blancos <sup>a</sup>	Polvos <sup>b</sup>	Blancos <sup>a</sup>	Polvos <sup>b</sup>
1	22-jun-09	11.7 ± 24.4	9.3 ± 15.6	29.7 ± 26.9	23.6 ± 17.3
2	23-jun-09	27.7 ± 17.8	21.0 ± 11.4	3.5 ± 16.5	2.9 ± 10.6
3	24-jun-09	10.0 ± 21.2	9.0 ± 13.8	V.D. <sup>c</sup>	V.D. <sup>c</sup>
4	25-jun-09	14.6 ± 19.3	11.0 ± 12.7	V.D. <sup>d</sup>	V.D. <sup>d</sup>
5	29-jun-09	V.D. <sup>d</sup>	V.D. <sup>d</sup>	92.6 ± 31.8	69.8 ± 21.5
6	30-jun-09	5.0 ± 26.0	4.5 ± 17.0	1.9 ± 35.0	1.4 ± 23.1

<sup>a</sup> Factores de emisión corregidos por el promedio de los blancos. <sup>b</sup> Factores de emisión corregidos por los polvos resuspendidos dentro del túnel. <sup>c</sup> Valor Descartado: fallas en el equipo. <sup>d</sup> Valor Descartado: número negativo.

**Tabla 18.** Factores de emisión de PM<sub>2.5</sub> por combustible consumido.

Factores de emisión en mg/L					
Corrida	Fecha	Tráfico Alto		Tráfico Moderado	
		Blancos <sup>a</sup>	Polvos <sup>b</sup>	Blancos <sup>a</sup>	Polvos <sup>b</sup>
1	22-jun-09	122 ± 253	97 ± 162	300 ± 272	239 ± 175
2	23-jun-09	389 ± 251	309 ± 161	63 ± 299	50 ± 192
3	24-jun-09	130 ± 252	107 ± 164	V.D. <sup>c</sup>	V.D. <sup>c</sup>
4	25-jun-09	415 ± 548	313 ± 360	V.D. <sup>d</sup>	V.D. <sup>d</sup>
5	29-jun-09	V.D. <sup>d</sup>	V.D. <sup>d</sup>	V.D. <sup>d</sup>	V.D. <sup>d</sup>
6	30-jun-09	79 ± 342	60 ± 226	23 ± 449	17 ± 296

<sup>a-d</sup> Como en la tabla 17.

Algunos factores fueron descartados debido a fallas en el equipo durante el monitoreo y por cruces entre las concentraciones de entrada y salida, tal y como ocurrió con el CO<sub>2</sub>. En la Figura 17 se presenta el comportamiento de las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> en función del tiempo. Es importante aclarar que estos valores descartados no coinciden con los excluidos para el CO<sub>2</sub>, ya que en la práctica, los experimentos para PM<sub>2.5</sub> y CO<sub>2</sub> son independientes, es decir, los equipos, herramientas y algunos parámetros, utilizados para ambos, son diferentes.

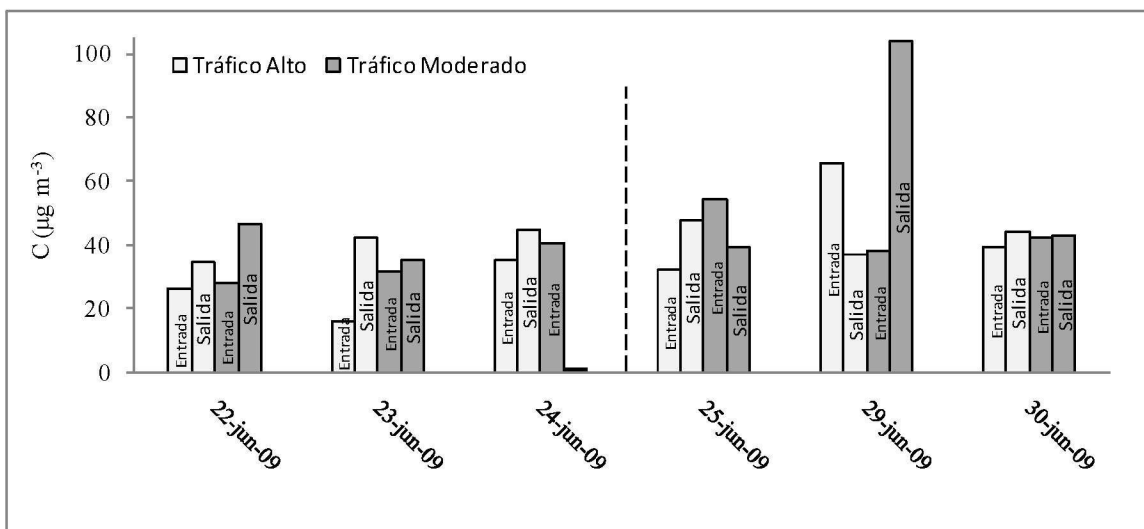


Figura 17. Concentraciones de PM<sub>2.5</sub> durante cada día de muestreo.

A partir de las Tablas 17 y 18, se calcularon factores de emisión promedio, los cuales se presentan en las Tablas 19 y 20. El que los factores de emisión por combustible consumido, obtenidos *pendiente abajo*, sean menores que los de *pendiente arriba* podría implicar que los vehículos en el sentido 2 no estaban acelerando. Por lo tanto, estos factores pudieran estar más sesgados al desgaste de frenos que a los gases de combustión, como se puede observar en los factores obtenidos por kilómetro recorrido, donde los factores *pendiente abajo* fueron mayores que los de *pendiente arriba*. Existen estudios como Garg *et al.*, 2000 que demuestran que una fuente móvil puede emitir entre 2.1 y 5.5 mg veh<sup>-1</sup> km<sup>-1</sup> de PM<sub>2.5</sub> por desgaste de frenos, dependiendo del tamaño del vehículo.

Tabla 19. Factores de emisión promedio por kilómetro recorrido.

Túnel de la Loma Larga, FE en mg veh <sup>-1</sup> km <sup>-1</sup>			
Corrección por Blancos		Corrección por Polvos resuspendidos	
Pendiente abajo	Pendiente arriba	Pendiente abajo	Pendiente arriba
28.8 ± 14.3	16.7 ± 9.7	21.7 ± 9.5	13.3 ± 6.3

Tabla 20. Factores de emisión promedio por combustible consumido.

Túnel de la Loma Larga, FE en mg/L			
Corrección por Blancos		Corrección por polvos resuspendidos	
Pendiente abajo	Pendiente arriba	Pendiente abajo	Pendiente arriba
173 ± 262	201 ± 119	130 ± 173	160 ± 77

Los factores de emisión corregidos por blancos representan la emisión total proveniente de fuentes móviles. Estas emisiones comprenden como única fuente primaria a los vehículos automotores, debido a las características intrínsecas de la técnica de medición en túneles. Sin embargo, no quedan exentas de la contribución de alguna fuente secundaria, como lo son los polvos resuspendidos dentro del túnel. Por lo tanto, para estimar factores de emisión más reales, se corrigieron las concentraciones crudas de  $PM_{2.5}$ , por el efecto de estos polvos fugitivos. En este estudio se determinó una contribución aproximada entre un 20% y 25% de estos polvos a las emisiones totales generadas por fuentes móviles en el Túnel de la Loma Larga (en base a los resultados de las Tablas 19 y 20). En la Figura 18 se puede observar el efecto de los polvos resuspendidos sobre los factores de emisión, donde se observa que estos siempre son menores que los factores no corregidos.

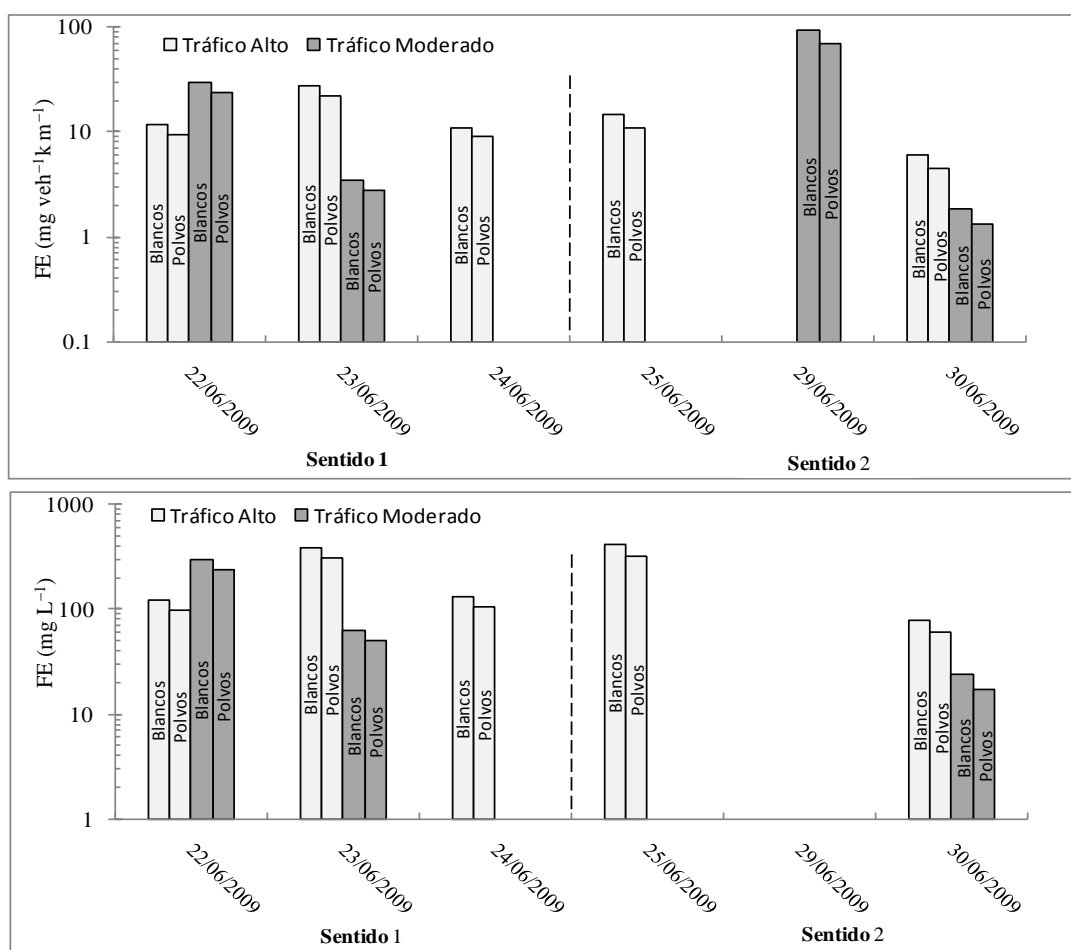


Figura 18. Efecto de los polvos resuspendidos sobre los factores de emisión de  $PM_{2.5}$ . El sentido 1 es pendiente arriba y el sentido 2 es pendiente abajo.

En la Tabla 21 se realiza una comparación de los factores de emisión de PM<sub>2.5</sub> calculados en este estudio, con los estimados en otros estudios similares. Es importante reiterar que estos factores de emisión son representativos para vehículos de trabajo ligero (LD) que utilizan gasolina como combustible. Los vehículos son relativamente nuevos, y seguramente cuentan con algún tipo de dispositivo para el control de emisiones. Como resultado de esta comparación podemos observar que los factores de emisión calculados en el Túnel de la Loma Larga son menores a los determinados en otras ciudades del mundo. También es pertinente apuntar el efecto del año en que se realizó este estudio, lo cual puede contribuir al bajo nivel en las emisiones, ya que el resto de los estudios con los que se compara fueron realizados entre hace cuatro y diez años.

**Tabla 21.** Comparación de factores de emisión de PM<sub>2.5</sub> con otros estudios.

Túnel	Tipo de vehículo	PM <sub>2.5</sub> (mg/km-veh)
Caldecott Tunnel, San Francisco Bay Area (Allen <i>et al.</i> , 2001)	HD	430±79
	LD	85±6
Shing Mun Tunnel, Hong Kong (Cheng <i>et al.</i> , 2006)	Promedio (HD, LD)	131±37
	Diesel	257±31
Woolloongabba Tunnel, Brisbane City (Jamriska <i>et al.</i> , 2004)	Diesel	267±207
Sepulveda Tunnel (Gillies <i>et al.</i> , 2001)	Promedio (HD, LD)	52±27
Söderledstunnel, Stockholm, Sweden (Kristensson <i>et al.</i> , 2004)	Promedio (HD, LD)	67±5
Kilborn Tunnel y Howell Tunnel, Milwaukee, U.S.A. (Lough <i>et al.</i> , 2005).	LD	33.4± 5.3
Túnel de la Loma Larga, Monterrey, Nuevo León (Este estudio)	Gasolina	17.5 ± 5.7 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Este factor es el promedio de los factores de emisión pendiente arriba y abajo de la de la Tabla 19, corregidos por polvos.

#### 4.4. CARACTERIZACIÓN DE PM<sub>2.5</sub>

Los factores de emisión de PM<sub>2.5</sub> de la sección anterior, corresponden a la masa total emitida como PM<sub>2.5</sub>. En este experimento se caracterizó esta masa para identificar algunos componentes principales. Los factores de emisión de estos componentes representan la emisión de cada una de las especies químicas que integran a los gases de combustión de fuentes móviles en el AMM. Además, se presentan los niveles de contribución por especie química a las emisiones totales mediante perfiles de emisión.

##### 4.4.1. Factores de emisión por especie.

Los resultados obtenidos para cada uno de los días de muestreo se encuentran en las Tablas 22 a la 25, tanto para tráfico alto como moderado. Las Tablas 22 y 23 corresponden a los factores de emisión corregidos por el promedio de los blancos, mientras que las Tablas 24 y 25 corresponden a las emisiones corregidas por el efecto de los polvos resuspendidos. Estos últimos no incluyen, adicionalmente, la corrección por blancos, ya que esta corrección no fue significativa al contribuir con menos del 1% de la masa total recolectada por filtro en cada monitoreo. Los valores negativos, de cada especie química, presentes en estas tablas no tienen un significado lógico en el sentido de factores de emisión. Su característica de “negativo” se debió a cruces entre las concentraciones de la entrada y la salida de cada tubo del túnel, generando así, gradientes de concentración negativos. Esto se atribuye, probablemente, a que la cantidad de masa emitida entre los puntos de muestreo no se distribuyó homogéneamente en toda el área transversal del túnel, aunado al bajo volumen de succión del equipo de muestreo. Sin embargo, esto es algo que suele presentarse en este tipo de estudios, como en los realizados por Laschober *et al.*, 2004 y Weingartner *et al.*, 1997, donde se han encontrado valores negativos en el cálculo de factores de emisión.

En los resultados de las tablas mencionadas anteriormente, si consideramos factores de emisión promedio, podemos observar que las emisiones de fuentes móviles están dominadas principalmente por carbón orgánico ( $12.72 \pm 12.21 \text{ mg-veh}^{-1} \text{ km}^{-1}$ ) y carbón elemental ( $5.17 \pm 8.32 \text{ mg-veh}^{-1} \text{ km}^{-1}$ ). Y de los metales el que más se emitió fue el Fe, con un factor de emisión de  $0.53 \pm 0.33 \text{ mg-veh}^{-1} \text{ km}^{-1}$ .









**Tabla 25.** Factores de emisión de PM<sub>2.5</sub> en mg·L<sup>-1</sup> (factores corregidos por polvos).

	22-jun-09		23-jun-09		24-jun-09		25-jun-09		29-jun-09		30-jun-09	
	Alto	Moderado	Alto	Moderado	Alto	Moderado	Alto	Moderado	Alto	Moderado	Alto	Moderado
Suma <sup>a</sup>	364.8139	271.54	452.492	357.0211	313.514		284.245	336.091	2841.121	597.586	126.5761	107.7372
Na	0.2709 ± 13.9813	-17.4741 ± 15.3248	8.4239 ± 9.7307	13.8206 ± 12.1089	2.0583 ± 13.8789	N.C.	-7.3115 ± 10.9522	-24.1411 ± 23.2738	515.6012 ± 1310.6807	137.4349 ± 441.0327	-13.8089 ± 20.5485	20.6711 ± 27.9305
Mg	1.0248 ± 2.9908	-5.6466 ± 4.1979	2.9178 ± 2.8436	0.0000 ± 2.0369	-0.5094 ± 1.7450	N.C.	0.0000 ± 3.9465	-5.3251 ± 6.7779	42.2196 ± 156.9284	1.1692 ± 54.9857	-4.2654 ± 4.4184	3.1954 ± 7.3105
Al	0.0000 ± 1.6239	0.0000 ± 1.7402	0.0000 ± 1.4215	0.0000 ± 1.7042	0.0000 ± 1.5181	N.C.	0.0000 ± 3.6354	0.0000 ± 3.3251	0.0000 ± 144.7723	0.0000 ± 51.8457	0.0000 ± 2.2565	0.0000 ± 3.2666
Si	0.0000 ± 1.6870	0.0000 ± 1.6201	0.0000 ± 1.1510	0.0000 ± 1.3992	0.0000 ± 1.2145	N.C.	0.0000 ± 3.4200	0.0000 ± 3.0040	0.0000 ± 127.3202	0.0000 ± 59.4058	0.0000 ± 2.0433	0.0000 ± 3.6558
P	0.3590 ± 0.2995	0.4619 ± 0.3263	0.2627 ± 0.2820	0.1647 ± 0.3496	0.3114 ± 0.3035	N.C.	0.2660 ± 0.6973	-0.4451 ± 0.6705	15.8458 ± 27.5403	-3.3517 ± 9.1689	0.4259 ± 0.4498	0.0000 ± 0.5850
S	0.7065 ± 2.6215	1.6002 ± 2.8921	3.6621 ± 1.3735	2.7944 ± 2.1103	-0.1280 ± 2.2244	N.C.	2.3727 ± 2.2716	-3.3698 ± 8.7487	61.9753 ± 326.2531	38.4988 ± 107.1969	0.2291 ± 4.1007	-0.4802 ± 9.0911
Cl	0.3672 ± 0.4942	0.0000 ± 0.5155	-0.5186 ± 0.5229	-0.4750 ± 0.5550	0.9662 ± 0.5115	N.C.	-0.9906 ± 1.0540	0.3640 ± 1.0040	0.0000 ± 40.9258	4.7964 ± 14.7543	-0.3331 ± 0.6868	0.6032 ± 0.9018
K	0.0000 ± 0.3993	-0.0284 ± 0.4534	0.1412 ± 0.4002	-0.1870 ± 0.4868	0.3475 ± 0.3940	N.C.	0.0000 ± 0.7880	-0.5572 ± 0.7251	-8.2974 ± 32.7304	-0.8640 ± 16.0274	-0.3458 ± 0.5054	0.8131 ± 1.0256
Ca	0.0000 ± 6.2979	0.0000 ± 0.6080	0.0000 ± 4.3331	0.0000 ± 5.2862	0.0000 ± 4.8371	N.C.	0.0000 ± 8.0230	0.0000 ± 6.7725	0.0000 ± 286.0772	0.0000 ± 144.4248	0.0000 ± 4.6934	0.0000 ± 8.1159
Ti	0.0466 ± 0.1191	0.0746 ± 0.1398	0.0456 ± 0.1149	-0.0241 ± 0.1373	0.0043 ± 0.1127	N.C.	0.6436 ± 0.3459	0.7657 ± 0.3054	-32.0878 ± 11.8624	-2.5355 ± 4.0353	-0.0412 ± 0.1809	0.5140 ± 0.3125
V	0.0376 ± 0.0985	-0.0675 ± 0.1159	0.0000 ± 0.0972	0.0000 ± 0.1160	0.0256 ± 0.1068	N.C.	0.0655 ± 0.2548	-0.0073 ± 0.2567	-6.0125 ± 10.6743	-1.4095 ± 3.5253	0.1234 ± 0.1604	0.1513 ± 0.2095
Cr	0.0000 ± 0.1198	0.0000 ± 0.1374	0.0000 ± 0.1072	0.0000 ± 0.1280	0.0765 ± 0.1274	N.C.	0.4011 ± 0.2848	0.1271 ± 0.2649	5.8550 ± 11.7388	0.0000 ± 3.5263	0.0060 ± 0.1911	-0.1202 ± 0.2321
Mn	0.0000 ± 0.1857	0.2348 ± 0.1962	0.2126 ± 0.1744	0.1530 ± 0.2045	0.0000 ± 0.1810	N.C.	0.0000 ± 0.4090	-0.6413 ± 0.3887	-4.2944 ± 16.8341	-0.3467 ± 5.6023	0.0107 ± 0.2718	-0.2562 ± 0.3261
Fe	4.6751 ± 1.3675	4.0739 ± 1.5022	4.0144 ± 1.2163	4.0720 ± 1.4958	1.0398 ± 0.9200	N.C.	22.3466 ± 5.5913	9.9398 ± 3.9518	-576.1283 ± 189.1851	-115.3558 ± 51.8408	7.6515 ± 2.8417	14.4205 ± 4.3371
Co	-0.0596 ± 0.4146	0.0000 ± 0.4232	0.0000 ± 0.3654	0.0000 ± 0.4716	0.0000 ± 0.3716	N.C.	0.5946 ± 0.9520	1.5717 ± 0.9212	0.0000 ± 37.7052	0.0000 ± 12.9879	0.2151 ± 0.5752	0.0000 ± 0.7527
Ni	0.2230 ± 0.3598	-0.3742 ± 0.4031	2.1382 ± 0.4777	0.2143 ± 0.4422	0.0000 ± 0.3716	N.C.	0.7863 ± 0.8466	0.4360 ± 0.7913	-40.1230 ± 34.9854	-2.4370 ± 11.5889	-0.4065 ± 0.5448	-0.7933 ± 0.7352
Cu	0.3055 ± 0.3608	-0.2981 ± 0.4382	0.6654 ± 0.4044	0.1716 ± 0.4693	-0.0362 ± 0.4024	N.C.	-0.1975 ± 0.8918	0.5289 ± 0.9477	-49.0227 ± 37.0345	2.1109 ± 12.8053	-0.0533 ± 0.6038	1.2200 ± 0.8003
Zn	0.5285 ± 0.4647	0.0190 ± 0.5202	6.7253 ± 4.2828	0.3113 ± 0.5266	-0.0753 ± 0.4803	N.C.	0.5208 ± 1.0639	0.2989 ± 1.0235	0.9466 ± 46.2251	8.4228 ± 16.1309	0.6005 ± 0.6623	0.0623 ± 0.9633
Ga	-0.0316 ± 0.2525	-0.4359 ± 0.2791	0.0296 ± 0.2362	0.1258 ± 0.2937	-0.0131 ± 0.2556	N.C.	0.5052 ± 0.5647	-0.1344 ± 0.5525	8.8974 ± 24.1745	-3.4652 ± 7.7227	-0.0452 ± 0.3514	-0.3238 ± 0.4826
Ge	0.3687 ± 0.2762	-0.1782 ± 0.2659	-0.3192 ± 0.2710	0.0000 ± 0.3438	0.0000 ± 0.3090	N.C.	0.3953 ± 0.5704	-0.3381 ± 0.5597	17.8477 ± 24.1745	0.0000 ± 9.4650	-0.1584 ± 0.4014	0.4422 ± 0.5123
As	-0.4767 ± 0.2899	-0.4346 ± 0.3256	0.0000 ± 0.3223	-0.0005 ± 0.2761	0.4585 ± 0.3076	N.C.	0.7921 ± 0.5565	0.0000 ± 0.7404	0.0000 ± 32.5013	-20.2752 ± 9.4503	-0.3175 ± 0.3621	0.0000 ± 0.6698
Se	0.2303 ± 0.2534	0.0333 ± 0.2883	0.0459 ± 0.2470	-0.0548 ± 0.2937	-0.3499 ± 0.2733	N.C.	0.5781 ± 0.5920	0.1342 ± 0.5507	-11.8917 ± 24.1745	-4.4705 ± 8.0936	-0.4735 ± 0.3856	-0.0586 ± 0.5006
Br	0.1385 ± 0.1969	0.0474 ± 0.2197	-0.1529 ± 0.2058	-0.3239 ± 0.2307	-0.2077 ± 0.2145	N.C.	0.3627 ± 0.4621	-0.4725 ± 0.4342	5.9465 ± 18.1063	-3.9556 ± 5.9990	0.0228 ± 0.2877	-0.0025 ± 0.3804
Rb	0.1986 ± 0.2524	0.2352 ± 0.2757	0.3309 ± 0.2500	0.6444 ± 0.3003	0.4841 ± 0.2598	N.C.	0.1411 ± 0.5938	-0.5074 ± 0.5527	-13.3675 ± 24.2491	-4.9149 ± 7.7488	0.1779 ± 0.3868	0.0224 ± 0.4841
Sr	-0.3697 ± 0.2877	0.0815 ± 0.3099	-0.1063 ± 0.2794	0.3253 ± 0.3491	0.0000 ± 0.2979	N.C.	0.2684 ± 0.6713	-0.8085 ± 0.6494	0.0000 ± 26.2778	6.1487 ± 9.1772	-0.1344 ± 0.4152	0.4813 ± 0.5673
Y	-0.2634 ± 0.3297	-0.0494 ± 0.3794	-0.8671 ± 0.3363	-0.6313 ± 0.4013	-0.3861 ± 0.3428	N.C.	-0.4336 ± 0.7720	0.6757 ± 0.7438	8.8667 ± 31.5482	-13.8545 ± 10.5995	0.0213 ± 0.4811	0.2063 ± 0.6503
Zr	0.0752 ± 0.3854	0.1532 ± 0.4461	-0.6531 ± 0.3837	0.2631 ± 0.4492	0.1115 ± 0.4086	N.C.	-0.5534 ± 0.9110	-0.8173 ± 0.8702	-19.3705 ± 36.2699	-1.3852 ± 12.1287	-0.0740 ± 0.5908	-0.9000 ± 0.7587
Mo	-0.4319 ± 0.5609	-0.6962 ± 0.6229	-1.0943 ± 0.5480	0.5386 ± 0.6522	1.1304 ± 0.5995	N.C.	-0.9761 ± 1.3064	-0.3381 ± 1.2420	71.1706 ± 54.0277	-1.9791 ± 17.5704	-0.4053 ± 0.8290	0.3834 ± 1.0882
Pd	-0.5235 ± 0.9174	0.0000 ± 1.0059	-0.1232 ± 0.9029	1.2979 ± 1.1051	-0.3687 ± 0.9372	N.C.	-0.1834 ± 2.1473	0.8763 ± 2.0555	0.0000 ± 88.2862	0.0000 ± 28.7482	0.4044 ± 1.3869	-1.7434 ± 1.8251
Ag	-0.0783 ± 0.8718	0.0000 ± 0.9373	0.2999 ± 0.8714	-0.3975 ± 1.0256	-0.5192 ± 0.8736	N.C.	0.6472 ± 0.2033	0.1660 ± 1.9390	34.1455 ± 84.0875	9.8921 ± 27.3745	0.4939 ± 1.3066	-2.9841 ± 1.7181
Cd	-0.0903 ± 0.8282	0.3216 ± 0.9148	-0.1232 ± 0.8210	-0.0376 ± 0.9862	-0.5053 ± 0.8520	N.C.	0.7574 ± 1.9478	2.5957 ± 1.9042	-59.2803 ± 82.3595	-17.7975 ± 26.7289	0.0895 ± 1.2619	-0.9146 ± 1.5902
In	0.0000 ± 0.8708	0.0000 ± 0.9376	0.0000 ± 0.8382	0.4327 ± 1.0209	0.0000 ± 0.8941	N.C.	0.0718 ± 2.0708	0.0000 ± 1.9338	0.0000 ± 82.8957	0.0000 ± 28.0746	-0.2020 ± 1.3078	0.0000 ± 1.7118
Sn	-0.1385 ± 1.0687	-1.0359 ± 1.1999	0.0000 ± 1.0310	0.0338 ± 1.2626	-1.1125 ± 1.1232	N.C.	1.8781 ± 2.5638	-0.4375 ± 2.4101	14.8599 ± 102.8548	20.7840 ± 34.4411	0.6963 ± 1.7435	-1.4847 ± 1.4447
Sb	0.3522 ± 1.2367	-0.2115 ± 1.3955	-0.3667 ± 1.1938	0.8265 ± 1.4656	-0.9049 ± 1.3091	N.C.	4.2569 ± 3.0251	1.3091 ± 2.7476	-60.8370 ± 123.9612	-16.2069 ± 40.0193	-1.1521 ± 1.8783	0.7862 ± 2.4918
Ba	0.0000 ± 0.3934	0.0823 ± 0.4345	0.2808 ± 0.3771	0.1843 ± 0.4597	0.1418 ± 0.4045	N.C.	0.9763 ± 0.9850	0.9305 ± 0.9125	-32.8409 ± 37.8698	0.2759 ± 12.9933	0.3628 ± 0.6405	0.4089 ± 0.8184
La	-0.0467 ± 0.2503	0.0000 ± 0.2746	0.0000 ± 0.2362	-0.1436 ± 0.2937	-0.0145 ± 0.2556	N.C.	0.0000 ± 0.5881	0.4052 ± 0.5748	0.0000 ± 23.0592	0.0000 ± 8.0666	0.0000 ± 0.3821	0.0000 ± 0.5006
Hg	-1.0373 ± 0.5651	0.0000 ± 0.6632	0.7992 ± 0.5661	0.1582 ± 0.6212	-0.4193 ± 0.5544	N.C.	0.0000 ± 1.4054	0.0000 ± 1.3369	30.8905 ± 49.4025	-4.4086 ± 16.6679	0.4485 ± 0.7701	-2.0911 ± 1.1060
Pb	0.8052 ± 0.5319	0.1808 ± 0.5902	-0.1670 ± 0.5107	0.0268 ± 0.5999	-0.1792 ± 0.5485	N.C.	0.2611 ± 1.2059	-0.4902 ± 1.1835	19.0435 ± 49.8134	19.0853 ± 17.0034	0.4968 ± 0.7666	0.2071 ± 1.0415
CT	-3.6120 ± 3.0580	-2.2219 ± 2.6399	-44.1600 ± 14.3099	18.1040 ± 16.0908	-3.9700 ± 2.7782	1.5432 ± 3.0736	26.0292 ± 24.8021	0.0000 ± 32.4672	0.0000 ± 1428.7373	369.7313 ± 340.0712	0.0000 ± 21.6869	3.4552 ± 3.6006
NO <sub>3</sub>	-0.3012 ± 3.0465	-9.5358 ± 5.7656	-14.8587 ± 13.5276	7.1096 ± 4.1046	-0.6422 ± 2.4963	1.8849 ± 13.5740	-4.8754 ± 4.5240	-8.2092 ± 9.8829	55.0121 ± 254.0662	238.2860 ± 187.9835	1.8300 ± 2.8226	5.2203 ± 16.7331
SO <sub>4</sub>	13.2396 ± 22.1559	-31.8808 ± 33.5033	45.5278 ± 19.2888	19.5231 ± 32.6209	3.0006 ± 25.1383	0.2453 ± 39.2132	-21.6046 ± 49.0937	-7.5200 ± 62.7569	-331.3350 ± 2866.9930	110.6807 ± 920.0149	3.2848 ± 39.3885	23.8776 ± 60.7229
Na <sup>+</sup>	-24.0791 ± 96.2140	150.9455 ± 90.2322	-11.8721 ± 94.1803	38.7608 ± 116.6443	1.3560 ± 95.0469	-4.4808 ± 107.3624	40.1305 ± 184.8439	-49.8567 ± 174.9512	-3967.9845 ± 7835.1252	10336.7292 ± 2103.7001	11.5619 ± 53.1918	17.2425 ± 70.0937
NH <sub>4</sub>	0.0000 ± 19.2717	0.0000 ± 20.2202	0.0000 ± 19.0143	0.0000 ± 22.5562	0.0000 ± 18.5781	0.0000 ± 20.0704	0.0000 ± 34.7962	0.0000 ± 32.4672	0.0000 ± 1428.7373	0.0000 ± 477.6130	0.0000 ± 21.6869	5.6633 ± 4.1672
K	-16.6320 ± 13.7437	0.0000 ± 20.2211	0.0000 ± 19.0147	0.0000 ± 22.5568	0.0000 ± 18.5786	0.0000 ± 20.0708	0.0000 ± 34.7962	0.0000 ± 32.4672	0.0000 ± 1428.7373	0.0000 ± 477.6130	0.0000 ± 21.6869	0.0000 ± 28.4170
OC	262.1547 ± 94.2875	152.4757 ± 96.4701	237.9633 ± 84.6547	187.3599 ± 100.5824	224.9136 ± 97.3397	186.4554 ± 111.1306	148.1830 ± 185.0344	244.3358 ± 155.9102	1931.9970 ± 6369.2108	-147.6683 ± 2177.6922	102.1337 ± 106.0650	-84.7835 ± 136.2538
EC	78.7063 ± 55.6646	111.4659 ± 60.0058	138.0055 ± 57.4755	116.4691 ± 64.7746	78.4440 ± 56.2247	110.6556 ± 60.8305	96.1731 ± 98.9343	70.6305 ± 93.0261	-1139.7673 ± 3764.5536	-702.7674 ± 1294.9119	6.8510 ± 62.2785	28.3872 ± 79.6251
TC	340.4096 ± 127.8898	264.5321 ± 133.7049	374.7512 ± 121.2926	306.7566 ± 139.5451	304.5196 ± 132.8117	296.4799 ± 149.5205	245.1916 ± 242.9547	318.3733 ± 211.3378	719.5341 ± 8368.4815	-876.4722 ± 2899.0017	107.6015 ± 143.2057	-54.1292 ± 182.3083

N

En la Tabla 26 se muestran se presentan los factores de emisión promedio, por especie, asociados con el volumen de combustible consumido, mientras que en la Tabla 27 se realizó una comparación del promedio de los resultados obtenidos, asociados con la distancia recorrida por un vehículo.

**Tabla 26.** Factores de emisión promedio de PM<sub>2.5</sub> por especie química en mg·L<sup>-1</sup>.

	Túnel de la Loma Larga							
	Corrección por Blancos				Corrección por Polvos			
	Alto		Moderado		Alto		Moderado	
Na	174.1126 ±	1338.1048	55.1761 ±	451.0954	174.7653 ±	1310.7914	57.3089 ±	442.0821
Mg	28.1601 ±	184.9990	1.9979 ±	7.9851	15.3874 ±	156.9826	2.1823 ±	55.4695
Al	5.5825 ±	151.0497	0.0000 ±	0.0000	0.0000 ±	0.0000	0.0000 ±	0.0000
Si	10.0578 ±	96.8234	2.1903 ±	3.8997	0.0000 ±	0.0000	0.0000 ±	0.0000
P	0.6431 ±	31.9400	0.2878 ±	0.5917	3.4319 ±	27.5558	0.3133 ±	0.4782
S	14.7543 ±	326.4630	13.5930 ±	107.2501	13.7891 ±	326.3002	14.2978 ±	107.2567
Cl	0.3674 ±	0.6139	1.8927 ±	17.2991	0.3672 ±	0.4942	1.9212 ±	14.8159
K	0.5703 ±	0.8121	0.6471 ±	1.1219	0.1412 ±	0.4002	0.8131 ±	1.0256
Ca	6.2885 ±	4.6281	5.4136 ±	4.4829	0.0000 ±	0.0000	0.0000 ±	0.0000
Ti	0.2178 ±	0.4651	0.3975 ±	0.5191	0.2453 ±	0.3834	0.4514 ±	0.4588
V	0.0225 ±	0.1856	0.0291 ±	0.2424	0.0755 ±	0.3168	0.1513 ±	0.2095
Cr	3.1457 ±	13.9276	0.1178 ±	0.3142	2.0874 ±	11.7438	0.1271 ±	0.2649
Mn	0.1677 ±	0.2196	0.1260 ±	0.3552	0.1117 ±	0.3230	0.1939 ±	0.2834
Fe	10.2212 ±	6.4317	9.0029 ±	6.0943	9.6719 ±	6.5335	8.1266 ±	6.2386
Co	0.4191 ±	1.2759	1.5860 ±	1.0440	0.4048 ±	1.1123	1.5717 ±	0.9212
Ni	1.9343 ±	0.5649	0.0630 ±	0.5702	1.0491 ±	1.0366	0.3252 ±	0.9065
Cu	0.4780 ±	0.4948	0.6987 ±	14.6884	0.4854 ±	0.5420	1.0079 ±	12.8738
Zn	1.9692 ±	52.9800	1.7606 ±	18.3107	1.8643 ±	46.4423	1.8228 ±	16.2089
Ga	3.1530 ±	28.4509	0.1259 ±	0.3800	3.1441 ±	24.1822	0.1258 ±	0.2937
Ge	4.2139 ±	29.1336	0.3248 ±	0.6174	6.2039 ±	24.1828	0.4422 ±	0.5273
As	0.7933 ±	0.7493	0.0000 ±	0.0000	0.7921 ±	0.5565	0.0000 ±	0.0000
Se	0.2748 ±	0.8319	0.0839 ±	0.7399	0.2847 ±	0.6897	0.0838 ±	0.6216
Br	1.1578 ±	21.3115	0.0403 ±	0.2731	1.6176 ±	18.1156	0.0474 ±	0.2197
Rb	0.2127 ±	0.9467	0.3001 ±	0.7702	0.2121 ±	0.7928	0.3007 ±	0.6329
Sr	0.2905 ±	0.7944	1.7247 ±	10.8855	0.2684 ±	0.6713	1.7592 ±	9.2066
Y	0.0219 ±	0.5680	0.3658 ±	1.1550	4.4440 ±	31.5519	0.4410 ±	0.9880
Zr	0.0000 ±	0.0000	0.0074 ±	0.5621	0.0752 ±	0.3854	0.2081 ±	0.6330
Mo	0.0000 ±	0.0000	0.0000 ±	0.0000	71.1706 ±	54.0277	0.4610 ±	1.2687
Pd	0.2030 ±	1.6158	0.9183 ±	2.7840	0.4044 ±	1.3869	1.0871 ±	2.3337
Ag	0.3015 ±	1.1106	0.0000 ±	0.0000	8.8966 ±	84.1265	5.0290 ±	27.4431
Cd	0.0000 ±	0.0000	0.8262 ±	2.2111	0.4235 ±	2.3209	1.4586 ±	2.1125
In	0.0000 ±	0.0000	0.2166 ±	1.3235	0.0718 ±	2.0708	0.4327 ±	1.0209
Sn	0.6989 ±	2.0095	0.0000 ±	0.0000	5.8114 ±	102.9015	10.4089 ±	34.4642
Sb	0.9928 ±	3.5322	0.0000 ±	0.0000	2.3045 ±	3.2682	0.9740 ±	3.9883
Ba	0.5653 ±	1.4339	0.4493 ±	1.6209	0.5400 ±	1.2340	0.3764 ±	13.0663
La	0.0000 ±	0.0000	0.2022 ±	0.6523	0.0000 ±	0.0000	0.4052 ±	0.5748
Hg	0.2355 ±	0.7041	0.1520 ±	0.7974	10.7127 ±	49.4117	0.1582 ±	0.6212
Pb	5.2576 ±	49.8329	4.8559 ±	17.0535	5.1517 ±	49.8368	4.8750 ±	17.0560
Cl-	26.0567 ±	24.8021	130.6874 ±	340.4707	26.0292 ±	24.8021	130.4302 ±	340.4707
NO-3	28.4601 ±	1130.7406	83.5727 ±	413.2077	28.4211 ±	254.0219	83.5386 ±	188.7714
SO42-	20.8231 ±	49.5015	51.9348 ±	927.5088	20.6841 ±	49.1365	51.3605 ±	922.5935
Na+	26.6241 ±	195.1671	2634.5802 ±	2144.7741	25.8462 ±	192.3451	2635.9195 ±	2110.0272
NH4+	0.0000 ±	0.0000	5.6633 ±	22.1770	0.0000 ±	0.0000	5.6633 ±	4.1672
K+	0.0000 ±	0.0000	0.0000 ±	0.0000	0.0000 ±	0.0000	0.0000 ±	0.0000
OC	196.0405 ±	59.1564	197.4496 ±	235.5835	195.0697 ±	53.2988	194.7238 ±	209.1203
EC	79.9684 ±	169.0463	82.4312 ±	180.3985	79.9340 ±	141.6636	81.7382 ±	150.9651
TC	275.6000 ±	79.9954	300.1700 ±	323.5667	274.4947 ±	71.6216	296.5540 ±	286.3800

**Tabla 27.** Factores de emisión promedio de PM<sub>2.5</sub> por especie química en mg-veh<sup>-1</sup>-km<sup>-1</sup>.

	Túnel de la Loma Larga				Gillies <i>et al.</i> , 2001	Cadle <i>et al.</i> , 1998	Norbeck <i>et al.</i> , 1998	Laschober <i>et al.</i> , 2004	Valiulis <i>et al.</i> , 2002
	Corrección por Blancos		Corrección por Polvos						
	Alto	Moderado	Alto	Moderado					
Na	0.2207 ± 1.9843	1.0166 ± 2.3303	0.2660 ± 1.9123	1.1884 ± 2.2805	0.30 ± 1.17	0.2	0.02		
Mg	0.1737 ± 0.3858	0.1014 ± 0.6545	0.1530 ± 0.3519	0.2494 ± 0.5707	0.26 ± 0.29	0.17	0.05		
Al	0.0346 ± 0.2256	0.0856 ± 0.1975	0.0000 ± 0.0000	0.0000 ± 0.0000	0.22 ± 0.15	0.08	0.03		
Si	0.0853 ± 0.2094	0.1539 ± 0.3389	0.0000 ± 0.0000	0.0000 ± 0.0000	0.56 ± 0.12	1.26	0.48		
P	0.0182 ± 0.0720	0.0164 ± 0.0617	0.0242 ± 0.0603	0.0226 ± 0.0515	0.09 ± 0.15	0.11	0.17		
S	0.0958 ± 0.4517	0.2161 ± 0.3016	0.1073 ± 0.4185	0.1564 ± 0.3091	0.32 ± 0.56	1.33	0.4		
Cl	0.0590 ± 0.0789	0.0356 ± 0.1139	0.0583 ± 0.0642	0.0359 ± 0.0979	0.32 ± 0.18	0.24	0.18		
K	0.0218 ± 0.0635	0.0451 ± 0.1033	0.0167 ± 0.0610	0.0334 ± 0.1010	0.08 ± 0.07	0.02	0.02		
Ca	0.3303 ± 0.3201	0.3671 ± 0.4465	0.0000 ± 0.0000	0.0000 ± 0.0000	0.30 ± 0.07	0.19	0.26		
Ti	0.0130 ± 0.0332	0.0261 ± 0.0421	0.0145 ± 0.0260	0.0273 ± 0.0381	0.09 ± 0.50	0.002	0.0002		
V	0.0047 ± 0.0213	0.0023 ± 0.0189	0.0050 ± 0.0243	0.0086 ± 0.0212	0.05 ± 0.21	0.002	0.0003	0.0010 ± 0.0007	
Cr	0.0083 ± 0.0181	0.0080 ± 0.0213	0.0070 ± 0.0206	0.0086 ± 0.0180	0.02 ± 0.05	0.01	0.003		
Mn	0.0119 ± 0.0156	0.0109 ± 0.0280	0.0072 ± 0.0325	0.0110 ± 0.0311	0.02 ± 0.03	0.004	0.002		0.02 ± 0.006
Fe	0.5085 ± 0.4104	0.6351 ± 0.4911	0.4896 ± 0.4198	0.5741 ± 0.5049	2.79 ± 0.29	0.72	0.46		
Co	0.0193 ± 0.0630	0.1075 ± 0.0708	0.0186 ± 0.0548	0.1065 ± 0.0624	0.00 ± 0.10				
Ni	0.1375 ± 0.0401	0.0035 ± 0.0315	0.0633 ± 0.0729	0.0169 ± 0.0738	0.01 ± 0.02	0.01	0.01	0.0018 ± 0.0021	
Cu	0.0281 ± 0.0657	0.0376 ± 0.1057	0.0469 ± 0.0660	0.0469 ± 0.0933	0.17 ± 0.02	0.02	0.01	0.0302 ± 0.0202	0.061 ± 0.009
Zn	0.1486 ± 0.3187	0.0137 ± 0.1373	0.1481 ± 0.3139	0.0110 ± 0.1182	0.14 ± 0.02	0.17	0.34	0.0342 ± 0.0299	0.092 ± 0.026
Ga	0.0100 ± 0.0324	0.0102 ± 0.0411	0.0100 ± 0.0260	0.0101 ± 0.0338	0.01 ± 0.04				
Ge	0.0218 ± 0.0420	0.0254 ± 0.0482	0.0247 ± 0.0334	0.0345 ± 0.0412					
As	0.0333 ± 0.0435	0.0781 ± 0.0448	0.0333 ± 0.0325	0.0779 ± 0.0363	0.00 ± 0.05				
Se	0.0138 ± 0.0589	0.0099 ± 0.0673	0.0153 ± 0.0483	0.0099 ± 0.0563	0.00 ± 0.02				
Br	0.0008 ± 0.0240	0.0040 ± 0.0270	0.0093 ± 0.0331	0.0099 ± 0.0317	0.01 ± 0.02	0.02	0.001		
Rb	0.0198 ± 0.0733	0.0199 ± 0.0698	0.0199 ± 0.0606	0.0199 ± 0.0577	0.00 ± 0.02				
Sr	0.0102 ± 0.0280	0.0222 ± 0.0696	0.0095 ± 0.0237	0.0212 ± 0.0572	0.02 ± 0.02				
Y	0.0016 ± 0.0428	0.0296 ± 0.0964	0.0016 ± 0.0362	0.0384 ± 0.0823	0.00 ± 0.03				
Zr	0.0000 ± 0.0000	0.0007 ± 0.0556	0.0140 ± 0.0692	0.0117 ± 0.0688	0.01 ± 0.03				
Mo	0.0416 ± 0.0627	0.0000 ± 0.0000	0.0952 ± 0.0505	0.0224 ± 0.1143	0.01 ± 0.06	0.00	0.0010		
Pd	0.0153 ± 0.1217	0.0543 ± 0.1803	0.0305 ± 0.1045	0.0655 ± 0.1521	0.02 ± 0.18	0.01	0.0003		
Ag	0.0214 ± 0.0789	0.0000 ± 0.0000	0.0271 ± 0.1364	0.0113 ± 0.1314	0.04 ± 0.20				
Cd	0.0163 ± 0.1254	0.0560 ± 0.1499	0.0369 ± 0.1589	0.0920 ± 0.1881	0.02 ± 0.22	0.01	0.000		
In	0.0000 ± 0.0000	0.0120 ± 0.0731	0.0025 ± 0.0730	0.0239 ± 0.0564					
Sn	0.0527 ± 0.1514	0.0000 ± 0.0000	0.0593 ± 0.1595	0.0019 ± 0.0697	0.10 ± 0.31	0.01	0.0010		
Sb	0.0571 ± 0.2259	0.0000 ± 0.0000	0.0877 ± 0.2272	0.0645 ± 0.3204	0.15 ± 0.37	0.01	0.0020		
Ba	0.0293 ± 0.1047	0.0319 ± 0.1200	0.0273 ± 0.0886	0.0283 ± 0.1020	0.36 ± 1.37	0.16	0.0400		0.102 ± 0.008
La	0.0000 ± 0.0000	0.0137 ± 0.0442	0.0000 ± 0.0000	0.0275 ± 0.0390	0.00 ± 1.83	0.04	0.0100		
Hg	0.0167 ± 0.0500	0.0066 ± 0.0872	0.0453 ± 0.0706	0.0128 ± 0.0726	0.01 ± 0.05				
Pb	0.0466 ± 0.0881	0.0149 ± 0.1054	0.0414 ± 0.0881	0.0118 ± 0.1055	0.03 ± 0.06	0.10	0.0200	0.0095 ± 0.0067	0.035 ± 0.006
Cl <sup>-</sup>	0.9187 ± 0.8745	0.6444 ± 0.9320	0.9177 ± 0.8745	0.6347 ± 0.9320	0.67 ± 0.99				
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.1382 ± 1.2744	0.4048 ± 2.3680	0.1379 ± 0.2127	0.4001 ± 1.3257	3.27 ± 1.17				
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1.1201 ± 5.8384	1.5887 ± 5.0945	1.0884 ± 5.8016	1.4710 ± 5.0708	1.77 ± 2.06			2.3 ± 0.8	
Na <sup>+</sup>	1.9216 ± 15.2723	6.2146 ± 12.5748	1.8919 ± 15.0552	6.1428 ± 12.2968	0.35 ± 0.16				
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.0000 ± 0.0000	0.4421 ± 1.7312	0.0000 ± 0.0000	0.4421 ± 0.3253	1.61 ± 1.06			1.2 ± 0.4	
K <sup>+</sup>	0.0000 ± 0.0000	0.0000 ± 0.0000	0.0000 ± 0.0000	0.0000 ± 0.0000	0.10 ± 0.08				
OC	14.8694 ± 19.0659	10.8063 ± 19.6370	14.8030 ± 17.0949	10.6419 ± 17.4250	19.27 ± 8.46			12.2 ± 8.0	
EC	4.9057 ± 13.4297	5.4762 ± 14.7207	4.8972 ± 11.2273	5.4335 ± 12.2959	25.5 ± 4.98			27.5 ± 4.3	
TC	20.4382 ± 26.0422	17.2333 ± 26.8636	20.3613 ± 23.2557	17.0175 ± 23.7412	44.26 ± 11.26			39.7 ± 6.7	

De la comparación hecha en la Tabla anterior se destaca lo siguiente:

- ◆ Los factores de emisión de azufre, en el Túnel de la Loma Larga, son entre dos y ocho veces menor que en otros lugares.
- ◆ Las emisiones de Fe son hasta 5 veces menores.
- ◆ En cuanto a las emisiones de Pb, éstas resultan ser un 60% y 20% menor.
- ◆ Los factores de emisión de carbón orgánico son entre un 20% mayor y un 13% menor, mientras que los factores de carbón elemental fueron hasta cinco veces menos con respecto a otros estudios.

#### 4.4.2. Perfiles de emisión

En las Figuras 19 a la 22 se muestran los niveles de contribución, de cada especie química, a la masa total emitida, expresado en porcentaje en peso (%P). Estos niveles corresponden a los perfiles de la entrada y salida (interior) del túnel, tal y como se describe en la Tabla 28.

**Tabla 28.** Descripción de los perfiles para fuentes móviles en el AMM.

<b>Clave</b>	<b>Descripción</b>
<b>TLLAE1</b>	Perfil de emisiones en la entrada del Túnel de Loma Larga, durante un tráfico alto en el sentido 1.
<b>TLLAS1</b>	Perfil de emisiones dentro del Túnel de Loma Larga, durante un tráfico alto en el sentido 1.
<b>TLLME1</b>	Perfil de emisiones en la entrada del Túnel de Loma Larga, durante un tráfico moderado en el sentido 1.
<b>TLLMS1</b>	Perfil de emisiones en la salida del Túnel de Loma Larga, durante un tráfico moderado en el sentido 1.
<b>TLLAE2</b>	Perfil de emisiones en la entrada del Túnel de Loma Larga, durante un tráfico alto en el sentido 2.
<b>TLLAS2</b>	Perfil de emisiones dentro del Túnel de Loma Larga, durante un tráfico alto en el sentido 2.
<b>TLLME1</b>	Perfil de emisiones en la entrada del Túnel de Loma Larga, durante un tráfico moderado en el sentido 2.
<b>TLLMS1</b>	Perfil de emisiones en la salida del Túnel de Loma Larga, durante un tráfico moderado en el sentido 2.

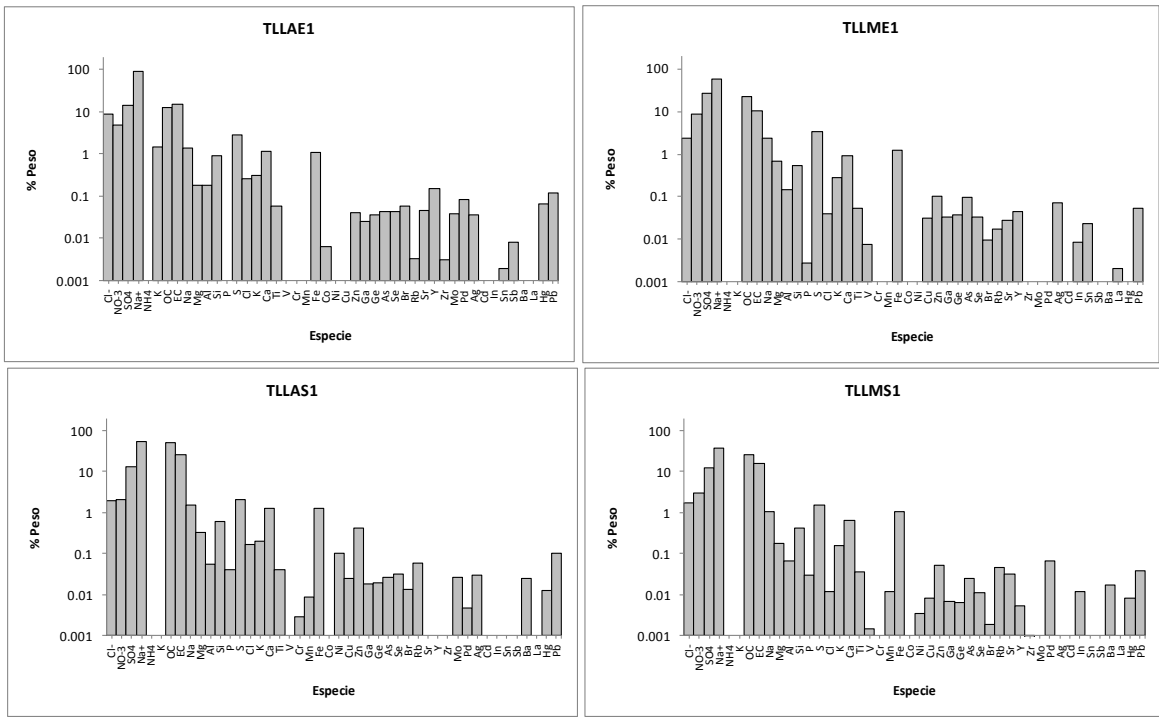


Figura 19. Perfiles de emisión promedio de PM<sub>2.5</sub> en el sentido 1 (Corregidos por blancos).

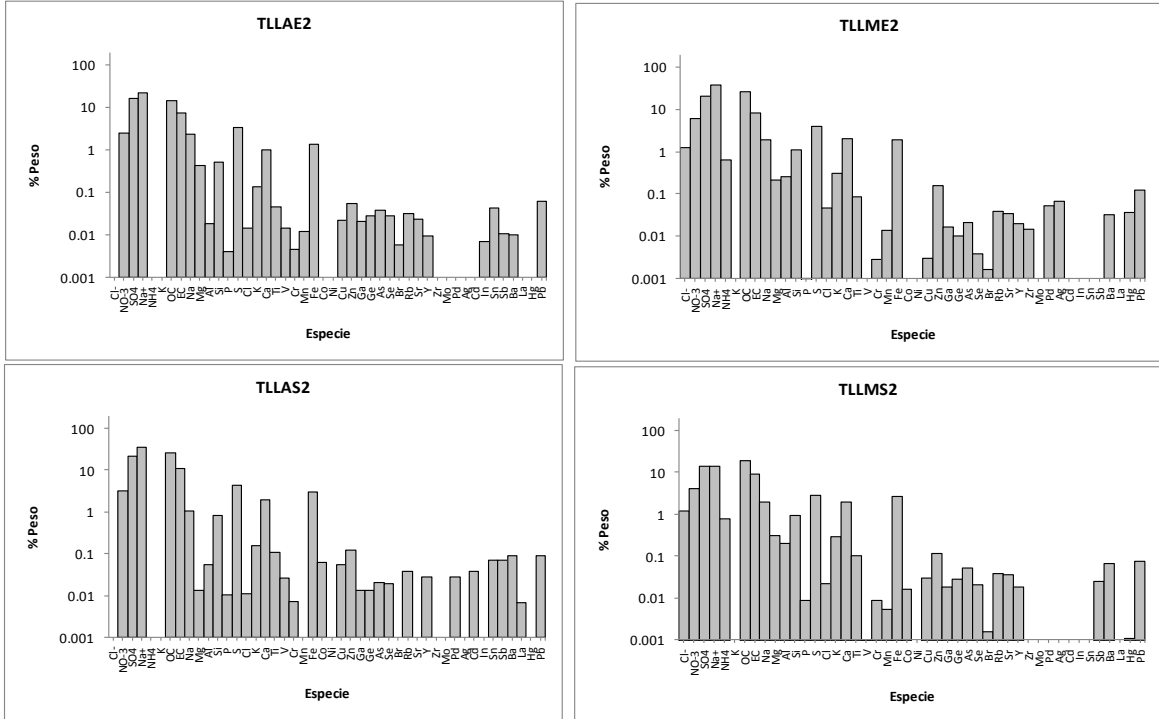


Figura 20. Perfiles de emisión promedio de PM<sub>2.5</sub> en el sentido 2 (Corregidos por blancos).

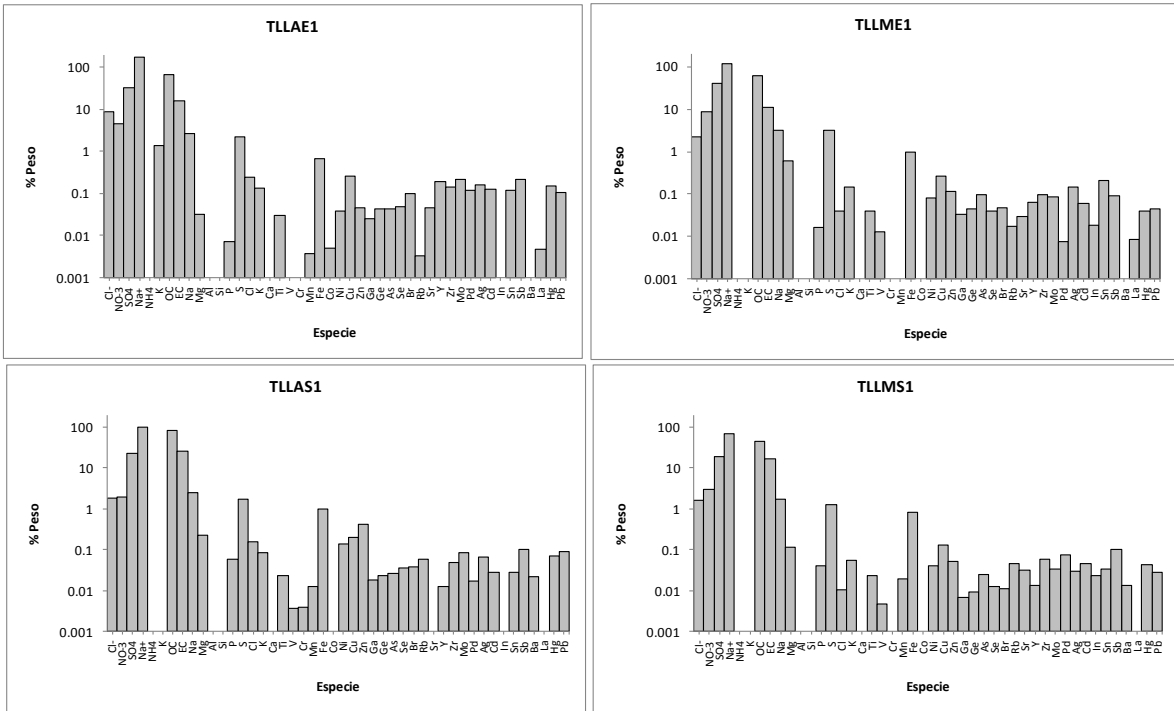


Figura 21. Perfiles de emisión promedio de PM<sub>2.5</sub> en el sentido 1 (Corregidos por polvos resuspendidos).

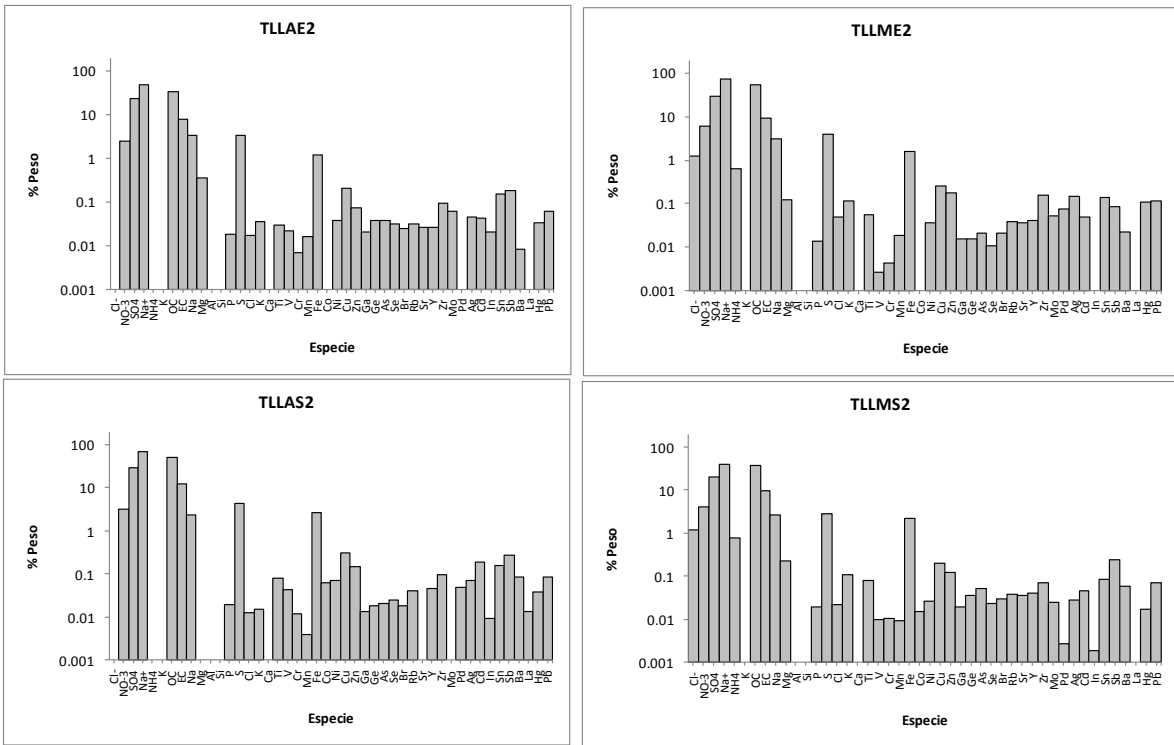


Figura 22. Perfiles de emisión promedio de PM<sub>2.5</sub> en el sentido 2 (Corregidos por polvos resuspendidos).

Estos perfiles representan la composición de los gases de combustión provenientes de fuentes móviles. Algo poco usual, en estos resultados, fueron las altas concentraciones de  $\text{Na}^+$  registradas en la entrada y salida del túnel, durante cada uno de los días de muestreo. Sin embargo, al determinar la diferencia entre los perfiles de entrada y salida, observamos que la contribución de  $\text{Na}^+$  es mucho menor (entre un 70-90% menos) a la diferencia total (suma de las diferencias entre cada una de las especies químicas). Lo anterior como consecuencia de que tanto en la entrada como en la salida se mantuvieron elevadas las concentraciones de este ion, generando así, un gradiente de concentraciones bajo. Posiblemente las elevadas concentraciones de ion sodio, se debieron a una fuente secundaria no identificada en este experimento, ya que éste ni siquiera es característico del perfil de polvos fugitivos o de caminos pavimentados (Watson y Chow, 2001; Vega *et al.*, 2001), o bien, puede ser que los filtros se hayan contaminado. Debido a estas consideraciones se descarto esta especie de los perfiles de emisión.

A partir de la discusión anterior, podemos determinar que las emisiones generadas por vehículos están integradas, en su mayor parte, por carbón orgánico (OC) y carbón elemental (EC). Esto se puede apreciar en cada uno de los perfiles, en particular para los correspondientes a la diferencia entre la entrada y salida del túnel. En estos perfiles, los porcentajes de contribución de OC y EC parecieran indicar que prácticamente las emisiones de fuentes móviles están dominadas por estas especies. En el interior del túnel se estimó que el OC y EC contribuyen con  $55.2 \pm 2.8\%$  y  $16.3 \pm 1.6\%$  a la masa total emitida (perfiles TLLAS1, TLLAS2, TLLMS1, TLLMS2) y en conjunto con un  $71.5 \pm 3.3\%$ . Este último valor es coherente con los obtenidos en estudios como Ma *et al.*, 2004, Allen *et al.*, 2001 y Gillies *et al.*, 2001, donde se obtuvieron valores de contribución de 83%, 97% y 78%, respectivamente, por parte de estas especies. Con esto se corrobora que el OC y EC dominan las emisiones de fuentes móviles en el AMM. Además, se puede apreciar que su contribución en el interior del túnel es mayor que a la entrada. Esto sucede de igual manera, para la mayor parte de las demás especies químicas. También se observó que la contribución del carbón orgánico disminuye al eliminar el efecto de los polvos resuspendidos, lo cual era de esperarse, ya que la masa total recolectada es la suma de la masa emitida por los vehículos más la masa en forma de  $\text{PM}_{2.5}$  que aportan los polvos.

Otras especies químicas de interés son el S y Pb, ambos indicadores de la calidad del combustible utilizado por fuentes vehiculares. Las contribuciones promedio de estos elementos fue de  $2.53 \pm 0.11\%$  para el S y  $0.069 \pm 0.019\%$  para el Pb. En otros estudios realizados en México (Watson y Chow, 2001) se han determinado contribuciones desde  $0.08 \pm 0.05\%$  hasta  $0.36 \pm 0.34\%$  para Pb y de  $0.816 \pm 0.143\%$  hasta  $2.406 \pm 1.732\%$  para S. A partir de esta comparación podemos decir que básicamente la gasolina utilizada en otras regiones de México conserva una composición parecida.

Por otro lado, es importante destacar que los perfiles corregidos por polvos resuspendidos no presentan, en particular, una contribución de sílice (Si) a las emisiones. La razón se debe a la suposición, en este estudio, de que los polvos fugitivos dentro del túnel se componen principalmente de esta especie química. Esto se fundamenta en estudios realizados sobre la composición química de polvos fugitivos, donde se ha demostrado que el  $17.3 \pm 1.2\%$  de los polvos de caminos pavimentados es Si (Vega et al., 2001), y que perfiles de fuentes móviles carecen de este elemento (Watson y Chow, 2001). Por esta razón, se realizó una caracterización química de los polvos depositados dentro del túnel, donde se obtuvo una composición de  $16.3 \pm 3.7\%$  de Si, lo cual confirma la comparación anterior.

Otra especie que presento resultados, poco usuales en los perfiles de fuentes móviles, fue el ión sulfato. Para esta especie se registro una contribución promedio, dentro del túnel, de  $15.30 \pm 0.85\%$  (considerando corrección por blancos). Este valor es entre 1.8 y 7.6 veces mayor que los resultados obtenidos en otros sitios, como Mexicali, México (Watson y Chow, 2001), donde se obtuvieron contribuciones desde  $2.004 \pm 0.631\%$  hasta  $8.592 \pm 4.756\%$ , de este ión. Las emisiones de  $\text{SO}_4^{2-}$  son características de las emisiones de fuentes industriales, en las que se han registrado valores de contribución hasta de  $47 \pm 13\%$  (Watson y Chow, 2001). En base a esto, podríamos determinar que las concentraciones de sulfato, registradas en este estudio, pudieran deberse a las emisiones de los vehículos y parte a la infiltración de emisiones de la zona industrial del AMM.



En la Tabla 29 y 30 se muestran los valores de los perfiles de emisión determinados en este estudio con el objeto de ser comparados con los perfiles obtenidos en otros sitios (para fuentes móviles) como Mexicali (México) e Imperial County (U.S.A). Los perfiles de estas ciudades se proporcionan en la Tabla 31 y 32 respectivamente. Al comparar el resto de las especies, podemos observar valores muy parecidos entre estas ciudades y los resultados obtenidos para el AMM. Por lo tanto, podríamos decir que las flotas vehiculares en Mexicali, Imperial County y el AMM son parecidas.

**Tabla 29.** Perfiles de emisión de PM<sub>2.5</sub> para fuentes móviles del AMM (corregidos por blancos).

Especie	TLLAE1	TLLAS1	TLLME1	TLLMS1	TLLAE2	TLLAS2	TLLME2	TLLMS2
Cl <sup>-</sup>	9.1467 ± 0.7241	1.9257 ± 0.7258	2.3159 ± 0.9699	1.6933 ± 0.1353	0.0000 ± 0.8166	0.0000 ± 1.0145	1.2513 ± 0.7318	1.1792 ± 0.2439
NO <sup>-3</sup>	4.7663 ± 1.8534	2.0324 ± 1.2601	8.8170 ± 1.4130	2.9809 ± 0.8729	2.4852 ± 0.6501	3.1373 ± 0.8088	6.1328 ± 0.9475	4.1615 ± 0.6819
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	14.5788 ± 2.2892	13.4313 ± 1.6534	26.9923 ± 2.7303	12.6080 ± 1.6469	16.2533 ± 1.5445	21.1047 ± 1.9764	20.6192 ± 1.9759	14.0397 ± 1.4481
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.0000 ± 2.9699	0.0000 ± 1.6695	0.0000 ± 2.0550	0.0000 ± 1.3589	0.0000 ± 1.0296	0.0000 ± 1.2797	0.6471 ± 1.2734	0.7847 ± 0.8028
K <sup>+</sup>	1.4707 ± 2.7431	0.0000 ± 1.6695	0.0000 ± 2.0550	0.0000 ± 1.3589	0.0000 ± 1.0296	0.0000 ± 1.2797	0.0000 ± 1.3887	0.0000 ± 0.9654
OC	12.4769 ± 10.4046	50.7464 ± 8.1578	22.5797 ± 7.9037	25.5486 ± 6.0649	14.2568 ± 4.1442	26.6348 ± 5.5791	27.2034 ± 5.9742	19.7536 ± 4.2770
EC	15.0709 ± 7.6096	25.9781 ± 4.9205	10.3784 ± 5.2662	16.2236 ± 3.9545	7.3205 ± 2.7310	11.3158 ± 3.4433	8.5032 ± 3.6057	9.0938 ± 2.6383
Na	1.3625 ± 1.2241	1.5247 ± 0.9802	2.4073 ± 0.9379	1.0582 ± 0.8037	2.3439 ± 1.0445	1.0843 ± 1.0417	1.8696 ± 1.1038	1.9805 ± 0.8101
Mg	0.1779 ± 0.2667	0.3210 ± 0.2481	0.6732 ± 0.2753	0.1823 ± 0.1699	0.4265 ± 0.2720	0.0137 ± 0.1743	0.2131 ± 0.2564	0.3047 ± 0.2095
Al	0.1808 ± 0.2054	0.0548 ± 0.1151	0.1422 ± 0.1363	0.0659 ± 0.0948	0.0185 ± 0.1147	0.0559 ± 0.1401	0.2631 ± 0.1558	0.2049 ± 0.1115
Si	0.9395 ± 0.1262	0.6160 ± 0.0780	0.5421 ± 0.0850	0.4303 ± 0.0625	0.5275 ± 0.0705	0.8389 ± 0.0953	1.0950 ± 0.1120	0.9686 ± 0.0945
P	0.0000 ± 0.0439	0.0405 ± 0.0259	0.0027 ± 0.0312	0.0300 ± 0.0213	0.0039 ± 0.0252	0.0107 ± 0.0301	0.0007 ± 0.0326	0.0091 ± 0.0235
S	2.8040 ± 0.2030	2.1143 ± 0.1542	3.3849 ± 0.2464	1.5144 ± 0.1311	3.4402 ± 0.2434	4.3882 ± 0.3038	4.0497 ± 0.3023	2.9026 ± 0.2419
Cl	0.2593 ± 0.0787	0.1635 ± 0.0427	0.0393 ± 0.0510	0.0121 ± 0.0335	0.0143 ± 0.0391	0.0108 ± 0.0468	0.0467 ± 0.0520	0.0225 ± 0.0363
K	0.3211 ± 0.0459	0.2015 ± 0.0255	0.2766 ± 0.0333	0.1605 ± 0.0230	0.1401 ± 0.0230	0.1596 ± 0.0277	0.3092 ± 0.0366	0.2874 ± 0.0303
Ca	1.1690 ± 0.0996	1.2538 ± 0.0931	0.8932 ± 0.0709	0.6567 ± 0.0603	1.0179 ± 0.0785	2.0097 ± 0.1399	2.0936 ± 0.1535	2.0040 ± 0.1407
Ti	0.0578 ± 0.0171	0.0407 ± 0.0097	0.0545 ± 0.0120	0.0353 ± 0.0084	0.0448 ± 0.0096	0.1066 ± 0.0135	0.0873 ± 0.0138	0.1065 ± 0.0119
V	0.0000 ± 0.0167	0.0000 ± 0.0087	0.0073 ± 0.0112	0.0014 ± 0.0077	0.0146 ± 0.0093	0.0267 ± 0.0116	0.0000 ± 0.0123	0.0010 ± 0.0086
Cr	0.0000 ± 0.0189	0.0028 ± 0.0106	0.0000 ± 0.0135	0.0000 ± 0.0087	0.0045 ± 0.0110	0.0070 ± 0.0125	0.0027 ± 0.0135	0.0090 ± 0.0096
Mn	0.0000 ± 0.0276	0.0089 ± 0.0152	0.0000 ± 0.0195	0.0119 ± 0.0124	0.0118 ± 0.0154	0.0000 ± 0.0182	0.0140 ± 0.0203	0.0053 ± 0.0137
Fe	1.1260 ± 0.0852	1.2809 ± 0.0980	1.2383 ± 0.0951	1.0507 ± 0.0863	1.3979 ± 0.0976	2.9514 ± 0.2071	1.9743 ± 0.1333	2.6391 ± 0.1896
Co	0.0065 ± 0.0595	0.0000 ± 0.0331	0.0000 ± 0.0410	0.0000 ± 0.0283	0.0000 ± 0.0323	0.0638 ± 0.0420	0.0000 ± 0.0428	0.0160 ± 0.0325
Ni	0.0000 ± 0.0587	0.1022 ± 0.0363	0.0000 ± 0.0411	0.0034 ± 0.0276	0.0000 ± 0.0316	0.0000 ± 0.0383	0.0000 ± 0.0418	0.0000 ± 0.0296
Cu	0.0000 ± 0.0580	0.0253 ± 0.0336	0.0303 ± 0.0429	0.0082 ± 0.0279	0.0220 ± 0.0335	0.0567 ± 0.0423	0.0029 ± 0.0433	0.0309 ± 0.0315
Zn	0.0405 ± 0.0690	0.4165 ± 0.2286	0.1033 ± 0.0499	0.0504 ± 0.0327	0.0552 ± 0.0380	0.1219 ± 0.0482	0.1604 ± 0.0530	0.1157 ± 0.0376
Ga	0.0253 ± 0.0391	0.0184 ± 0.0220	0.0328 ± 0.0283	0.0067 ± 0.0181	0.0204 ± 0.0213	0.0135 ± 0.0256	0.0160 ± 0.0283	0.0190 ± 0.0194
Ge	0.0356 ± 0.0438	0.0198 ± 0.0242	0.0369 ± 0.0295	0.0065 ± 0.0200	0.0274 ± 0.0219	0.0137 ± 0.0277	0.0098 ± 0.0311	0.0285 ± 0.0203
As	0.0442 ± 0.0514	0.0267 ± 0.0285	0.0975 ± 0.0320	0.0251 ± 0.0223	0.0388 ± 0.0266	0.0204 ± 0.0335	0.0210 ± 0.0357	0.0526 ± 0.0245
Se	0.0432 ± 0.0408	0.0317 ± 0.0221	0.0336 ± 0.0285	0.0109 ± 0.0185	0.0276 ± 0.0221	0.0199 ± 0.0261	0.0037 ± 0.0283	0.0208 ± 0.0206
Br	0.0577 ± 0.0316	0.0130 ± 0.0176	0.0097 ± 0.0220	0.0018 ± 0.0139	0.0057 ± 0.0166	0.0000 ± 0.0199	0.0016 ± 0.0217	0.0016 ± 0.0155
Rb	0.0033 ± 0.0403	0.0573 ± 0.0222	0.0172 ± 0.0275	0.0448 ± 0.0188	0.0313 ± 0.0220	0.0390 ± 0.0262	0.0381 ± 0.0283	0.0379 ± 0.0200
Sr	0.0468 ± 0.0458	0.0000 ± 0.0252	0.0279 ± 0.0321	0.0326 ± 0.0214	0.0241 ± 0.0247	0.0000 ± 0.0295	0.0339 ± 0.0333	0.0362 ± 0.0229
Y	0.1517 ± 0.0543	0.0000 ± 0.0290	0.0434 ± 0.0376	0.0054 ± 0.0246	0.0097 ± 0.0286	0.0274 ± 0.0342	0.0201 ± 0.0382	0.0189 ± 0.0262
Zr	0.0031 ± 0.0629	0.0000 ± 0.0346	0.0000 ± 0.0443	0.0003 ± 0.0286	0.0000 ± 0.0343	0.0000 ± 0.0402	0.0145 ± 0.0447	0.0000 ± 0.0308
Mo	0.0387 ± 0.0910	0.0254 ± 0.0492	0.0000 ± 0.0627	0.0000 ± 0.0406	0.0000 ± 0.0487	0.0000 ± 0.0578	0.0000 ± 0.0639	0.0000 ± 0.0443
Pd	0.0831 ± 0.1455	0.0048 ± 0.0804	0.0000 ± 0.1012	0.0676 ± 0.0680	0.0000 ± 0.0797	0.0286 ± 0.0963	0.0538 ± 0.1044	0.0000 ± 0.0733
Ag	0.0357 ± 0.1371	0.0296 ± 0.0763	0.0695 ± 0.0959	0.0000 ± 0.0625	0.0000 ± 0.0749	0.0000 ± 0.0913	0.0667 ± 0.0989	0.0000 ± 0.0684
Cd	0.0000 ± 0.1318	0.0000 ± 0.0733	0.0000 ± 0.0918	0.0000 ± 0.0616	0.0000 ± 0.0720	0.0382 ± 0.0903	0.0000 ± 0.0941	0.0000 ± 0.0661
In	0.0000 ± 0.1379	0.0000 ± 0.0768	0.0083 ± 0.0962	0.0116 ± 0.0633	0.0068 ± 0.0752	0.0000 ± 0.0918	0.0000 ± 0.1002	0.0000 ± 0.0700
Sn	0.0020 ± 0.1705	0.0000 ± 0.0956	0.0225 ± 0.1223	0.0000 ± 0.0790	0.0422 ± 0.0956	0.0693 ± 0.1169	0.0000 ± 0.1251	0.0000 ± 0.0876
Sb	0.0082 ± 0.1971	0.0000 ± 0.1089	0.0000 ± 0.1387	0.0000 ± 0.0920	0.0106 ± 0.1093	0.0687 ± 0.1320	0.0000 ± 0.1439	0.0259 ± 0.1018
Ba	0.0000 ± 0.0618	0.0246 ± 0.0341	0.0000 ± 0.0427	0.0174 ± 0.0289	0.0103 ± 0.0350	0.0898 ± 0.0429	0.0322 ± 0.0457	0.0655 ± 0.0331
La	0.0000 ± 0.0377	0.0000 ± 0.0211	0.0021 ± 0.0265	0.0000 ± 0.0179	0.0000 ± 0.0212	0.0068 ± 0.0260	0.0000 ± 0.0276	0.0000 ± 0.0201
Hg	0.0672 ± 0.0888	0.0124 ± 0.0478	0.0000 ± 0.0622	0.0081 ± 0.0397	0.0000 ± 0.0464	0.0000 ± 0.0563	0.0360 ± 0.0626	0.0011 ± 0.0456
Pb	0.1088 ± 0.0655	0.0909 ± 0.0360	0.0438 ± 0.0459	0.0287 ± 0.0296	0.0608 ± 0.0387	0.0832 ± 0.0457	0.1139 ± 0.0511	0.0718 ± 0.0358
Suma	66.7096 ± 13.9144	102.6359 ± 10.1186	81.3238 ± 10.4977	64.5939 ± 7.7697	50.1153 ± 5.6170	74.6170 ± 7.2967	77.0006 ± 7.6907	60.9998 ± 5.5085

**Tabla 30.** Perfiles de emisión de PM<sub>2.5</sub> para fuentes móviles del AMM (corregidos por polvos).

Especie	TLLAE1	TLLAS1	TLLME1	TLLMS1	TLLAE2	TLLAS2	TLLME2	TLLMS2
Cl <sup>-</sup>	9.0593 ± 0.7242	1.8807 ± 0.7258	2.2777 ± 0.9699	1.6533 ± 0.1354	0.0000 ± 0.8166	0.0000 ± 1.0145	1.2499 ± 0.7318	1.1778 ± 0.2439
NO <sup>-3</sup>	4.6604 ± 0.3166	1.9778 ± 0.7280	8.7559 ± 0.6207	2.9323 ± 0.2363	2.4844 ± 0.1709	3.1359 ± 0.2137	6.1310 ± 0.4259	4.1599 ± 0.3436
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	32.2606 ± 2.2567	23.6461 ± 1.6411	40.0155 ± 2.7166	19.3032 ± 1.6384	23.4213 ± 1.5359	30.1850 ± 1.9660	30.4358 ± 1.9636	20.5469 ± 1.4400
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.0000 ± 2.3421	0.0000 ± 1.3150	0.0000 ± 1.6160	0.0000 ± 1.0680	0.0000 ± 0.8166	0.0000 ± 1.0145	0.6471 ± 0.9514	0.7847 ± 0.5454
K <sup>+</sup>	1.4012 ± 2.0470	0.0000 ± 1.3150	0.0000 ± 1.6161	0.0000 ± 1.0680	0.0000 ± 0.8166	0.0000 ± 1.0145	0.0000 ± 1.1010	0.0000 ± 0.7648
OC	67.7000 ± 8.6714	82.9863 ± 7.4879	62.5632 ± 6.8183	46.8022 ± 5.4575	34.8361 ± 3.6420	52.6864 ± 5.0078	55.3482 ± 5.3454	38.3850 ± 3.8529
EC	16.1403 ± 6.1903	26.5438 ± 4.2426	11.2726 ± 4.2742	16.5755 ± 3.3898	8.0188 ± 2.2686	12.1984 ± 2.8776	9.4552 ± 2.9651	9.7221 ± 2.2185
Na	2.7664 ± 1.1400	2.4998 ± 0.9475	3.1131 ± 0.8852	1.6973 ± 0.7771	3.3600 ± 1.0250	2.3198 ± 1.0114	3.2301 ± 1.0701	2.6927 ± 0.7878
Mg	0.0331 ± 0.2122	0.2202 ± 0.2309	0.6142 ± 0.2513	0.1133 ± 0.1528	0.3675 ± 0.2620	0.0000 ± 0.1488	0.1239 ± 0.2368	0.2316 ± 0.1981
Al	0.0000 ± 0.1852	0.0000 ± 0.1051	0.0000 ± 0.1210	0.0000 ± 0.0864	0.0000 ± 0.1098	0.0000 ± 0.1354	0.0000 ± 0.1526	0.0000 ± 0.1130
Si	0.0000 ± 0.1579	0.0000 ± 0.0999	0.0000 ± 0.1054	0.0000 ± 0.0797	0.0000 ± 0.0925	0.0000 ± 0.1265	0.0000 ± 0.1501	0.0000 ± 0.1289
P	0.0073 ± 0.0348	0.0588 ± 0.0211	0.0165 ± 0.0250	0.0414 ± 0.0174	0.0183 ± 0.0221	0.0193 ± 0.0261	0.0138 ± 0.0282	0.0192 ± 0.0206
S	2.2639 ± 0.2114	1.7602 ± 0.1588	3.0733 ± 0.2495	1.2670 ± 0.1346	3.3767 ± 0.2433	4.2871 ± 0.3037	3.9178 ± 0.3022	2.7859 ± 0.2419
Cl	0.2511 ± 0.0651	0.1568 ± 0.0347	0.0402 ± 0.0407	0.0107 ± 0.0266	0.0169 ± 0.0336	0.0123 ± 0.0397	0.0496 ± 0.0444	0.0214 ± 0.0310
K	0.1318 ± 0.0483	0.0860 ± 0.0280	0.1445 ± 0.0345	0.0556 ± 0.0246	0.0361 ± 0.0243	0.0153 ± 0.0303	0.1159 ± 0.0399	0.1052 ± 0.0339
Ca	0.0000 ± 0.5919	0.0000 ± 0.3807	0.0000 ± 0.3958	0.0000 ± 0.3008	0.0000 ± 0.2047	0.0000 ± 0.2942	0.0000 ± 0.3433	0.0000 ± 0.2992
Ti	0.0302 ± 0.0141	0.0225 ± 0.0081	0.0386 ± 0.0099	0.0226 ± 0.0072	0.0291 ± 0.0086	0.0816 ± 0.0125	0.0547 ± 0.0127	0.0777 ± 0.0114
V	0.0000 ± 0.0132	0.0037 ± 0.0065	0.0129 ± 0.0087	0.0047 ± 0.0061	0.0217 ± 0.0081	0.0420 ± 0.0101	0.0027 ± 0.0106	0.0100 ± 0.0074
Cr	0.0000 ± 0.0142	0.0039 ± 0.0079	0.0000 ± 0.0104	0.0000 ± 0.0065	0.0069 ± 0.0095	0.0116 ± 0.0104	0.0044 ± 0.0112	0.0105 ± 0.0081
Mn	0.0036 ± 0.0222	0.0126 ± 0.0121	0.0000 ± 0.0158	0.0187 ± 0.0098	0.0159 ± 0.0136	0.0040 ± 0.0157	0.0185 ± 0.0177	0.0092 ± 0.0118
Fe	0.6896 ± 0.0971	0.9947 ± 0.1026	0.9865 ± 0.1000	0.8509 ± 0.0896	1.2022 ± 0.1001	2.6402 ± 0.2094	1.5680 ± 0.1383	2.2797 ± 0.1924
Co	0.0050 ± 0.0473	0.0000 ± 0.0261	0.0000 ± 0.0325	0.0000 ± 0.0229	0.0000 ± 0.0280	0.0629 ± 0.0368	0.0000 ± 0.0367	0.0155 ± 0.0287
Ni	0.0393 ± 0.0455	0.1424 ± 0.0296	0.0825 ± 0.0320	0.0393 ± 0.0216	0.0388 ± 0.0269	0.0707 ± 0.0322	0.0369 ± 0.0352	0.0256 ± 0.0251
Cu	0.2613 ± 0.0462	0.2037 ± 0.0272	0.2684 ± 0.0353	0.1308 ± 0.0227	0.2120 ± 0.0295	0.3156 ± 0.0374	0.2626 ± 0.0378	0.2059 ± 0.0278
Zn	0.0451 ± 0.0546	0.4212 ± 0.2274	0.1128 ± 0.0405	0.0526 ± 0.0263	0.0743 ± 0.0329	0.1438 ± 0.0420	0.1814 ± 0.0464	0.1261 ± 0.0331
Ga	0.0253 ± 0.0302	0.0183 ± 0.0169	0.0328 ± 0.0224	0.0067 ± 0.0141	0.0203 ± 0.0181	0.0134 ± 0.0215	0.0159 ± 0.0239	0.0190 ± 0.0163
Ge	0.0439 ± 0.0345	0.0238 ± 0.0188	0.0451 ± 0.0228	0.0094 ± 0.0157	0.0380 ± 0.0182	0.0183 ± 0.0233	0.0154 ± 0.0265	0.0364 ± 0.0168
As	0.0440 ± 0.0385	0.0266 ± 0.0211	0.0973 ± 0.0215	0.0250 ± 0.0159	0.0388 ± 0.0217	0.0203 ± 0.0275	0.0209 ± 0.0291	0.0525 ± 0.0198
Se	0.0477 ± 0.0323	0.0368 ± 0.0171	0.0398 ± 0.0227	0.0123 ± 0.0145	0.0315 ± 0.0191	0.0245 ± 0.0221	0.0110 ± 0.0239	0.0235 ± 0.0177
Br	0.1008 ± 0.0255	0.0375 ± 0.0141	0.0480 ± 0.0178	0.0108 ± 0.0109	0.0246 ± 0.0143	0.0177 ± 0.0169	0.0210 ± 0.0185	0.0301 ± 0.0134
Rb	0.0034 ± 0.0318	0.0578 ± 0.0173	0.0174 ± 0.0214	0.0451 ± 0.0149	0.0321 ± 0.0190	0.0398 ± 0.0222	0.0387 ± 0.0240	0.0381 ± 0.0170
Sr	0.0458 ± 0.0356	0.0000 ± 0.0193	0.0292 ± 0.0250	0.0316 ± 0.0167	0.0269 ± 0.0210	0.0000 ± 0.0247	0.0361 ± 0.0283	0.0366 ± 0.0194
Y	0.1887 ± 0.0430	0.0123 ± 0.0222	0.0628 ± 0.0298	0.0134 ± 0.0194	0.0268 ± 0.0244	0.0456 ± 0.0287	0.0410 ± 0.0325	0.0393 ± 0.0222
Zr	0.1464 ± 0.0492	0.0496 ± 0.0266	0.0959 ± 0.0349	0.0601 ± 0.0222	0.0951 ± 0.0294	0.0967 ± 0.0336	0.1578 ± 0.0378	0.0707 ± 0.0260
Mo	0.2202 ± 0.0719	0.0840 ± 0.0378	0.0848 ± 0.0493	0.0338 ± 0.0315	0.0617 ± 0.0418	0.0000 ± 0.0486	0.0535 ± 0.0543	0.0251 ± 0.0375
Pd	0.1222 ± 0.1137	0.0167 ± 0.0620	0.0075 ± 0.0791	0.0763 ± 0.0537	0.0000 ± 0.0684	0.0479 ± 0.0818	0.0746 ± 0.0887	0.0028 ± 0.0625
Ag	0.1652 ± 0.1079	0.0667 ± 0.0596	0.1441 ± 0.0758	0.0299 ± 0.0488	0.0464 ± 0.0645	0.0717 ± 0.0780	0.1473 ± 0.0844	0.0272 ± 0.0583
Cd	0.1291 ± 0.1028	0.0279 ± 0.0567	0.0583 ± 0.0717	0.0453 ± 0.0484	0.0428 ± 0.0617	0.1913 ± 0.0776	0.0486 ± 0.0796	0.0456 ± 0.0561
In	0.0000 ± 0.1072	0.0000 ± 0.0592	0.0184 ± 0.0749	0.0232 ± 0.0491	0.0205 ± 0.0642	0.0092 ± 0.0779	0.0000 ± 0.0852	0.0019 ± 0.0597
Sn	0.1194 ± 0.1308	0.0273 ± 0.0731	0.2019 ± 0.0957	0.0345 ± 0.0608	0.1561 ± 0.0819	0.1574 ± 0.0995	0.1411 ± 0.1060	0.0837 ± 0.0744
Sb	0.2224 ± 0.1533	0.1019 ± 0.0837	0.0890 ± 0.1087	0.1031 ± 0.0722	0.1817 ± 0.0941	0.2730 ± 0.1123	0.0872 ± 0.1227	0.2348 ± 0.0873
Ba	0.0000 ± 0.0486	0.0221 ± 0.0264	0.0000 ± 0.0335	0.0136 ± 0.0229	0.0084 ± 0.0305	0.0823 ± 0.0373	0.0223 ± 0.0394	0.0568 ± 0.0290
La	0.0049 ± 0.0302	0.0000 ± 0.0169	0.0086 ± 0.0213	0.0000 ± 0.0145	0.0000 ± 0.0186	0.0137 ± 0.0228	0.0000 ± 0.0239	0.0000 ± 0.0176
Hg	0.1508 ± 0.0724	0.0709 ± 0.0380	0.0395 ± 0.0509	0.0440 ± 0.0318	0.0335 ± 0.0402	0.0375 ± 0.0484	0.1122 ± 0.0543	0.0172 ± 0.0400
Pb	0.1088 ± 0.0655	0.0909 ± 0.0360	0.0438 ± 0.0459	0.0287 ± 0.0296	0.0608 ± 0.0387	0.0832 ± 0.0457	0.1139 ± 0.0511	0.0718 ± 0.0358
Suma	139.6384 ± 11.4389	144.3926 ± 9.0841	134.5525 ± 8.9362	92.2182 ± 6.8631	78.4832 ± 4.9091	109.4755 ± 6.4599	114.0057 ± 6.7538	84.3054 ± 4.8802

**Tabla 31.** Perfiles de emisión de fuentes móviles en Mexicali (México). ND = Valor no disponible.  
Perfiles obtenidos de Watson y Chow, 2001.

Especie	IMRSC	IMRSCC2	IMRSEC	IMRSIC	IMRSJC	IMRSUC
Cl <sup>-</sup>	5.254 ± 4.802	3.716 ± 4.424	7.035 ± 5.560	1.875 ± 2.258	7.879 ± 5.909	5.649 ± 3.519
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	6.922 ± 5.928	4.452 ± 1.973	4.856 ± 3.142	5.407 ± 3.829	12.151 ± 9.606	4.892 ± 3.452
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	3.166 ± 1.450	4.511 ± 0.574	2.918 ± 1.210	2.004 ± 0.631	3.679 ± 2.081	8.592 ± 4.756
Na <sup>+</sup>	0.556 ± 0.197	2.514 ± 1.641	4.351 ± 2.721	1.820 ± 1.135	3.695 ± 0.853	2.048 ± 1.921
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	3.148 ± 1.813	0.851 ± 0.266	0.594 ± 0.060	0.422 ± 0.164	0.455 ± 0.086	3.459 ± 1.921
K <sup>+</sup>	1.437 ± 1.925	4.138 ± 4.136	1.083 ± 0.525	0.702 ± 0.488	0.724 ± 0.631	1.479 ± 0.665
OC	44.965 ± 15.872	54.348 ± 35.144	36.388 ± 10.085	40.435 ± 7.597	51.818 ± 13.510	74.709 ± 47.307
EC	18.315 ± 5.166	13.451 ± 2.841	15.566 ± 3.914	20.547 ± 6.478	22.074 ± 3.602	23.159 ± 14.043
Na	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Mg	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Al	0.060 ± 1.200	0.000 ± 1.161	0.000 ± 1.522	0.221 ± 1.498	0.000 ± 3.769	9.897 ± 22.939
Si	0.000 ± 3.222	0.000 ± 3.194	0.000 ± 4.335	0.000 ± 4.028	0.000 ± 10.002	28.307 ± 62.294
P	0.071 ± 0.075	0.060 ± 0.101	0.036 ± 0.115	0.079 ± 0.044	0.106 ± 0.130	0.072 ± 0.380
S	1.385 ± 0.669	1.425 ± 0.173	1.352 ± 0.573	0.816 ± 0.143	1.960 ± 0.943	2.406 ± 1.732
Cl	5.396 ± 5.908	4.701 ± 5.132	10.803 ± 8.659	1.798 ± 2.751	4.051 ± 3.508	5.100 ± 3.580
K	0.699 ± 0.612	0.507 ± 0.717	1.211 ± 0.622	0.362 ± 0.566	0.650 ± 0.595	0.702 ± 3.280
Ca	0.024 ± 0.470	0.132 ± 0.439	0.000 ± 0.644	0.000 ± 0.609	0.000 ± 1.450	1.099 ± 8.521
Ti	0.002 ± 0.118	0.000 ± 0.389	0.005 ± 0.208	0.002 ± 0.106	0.000 ± 0.257	0.000 ± 0.570
V	0.006 ± 0.067	0.006 ± 0.239	0.011 ± 0.111	0.004 ± 0.061	0.003 ± 0.139	0.000 ± 0.390
Cr	0.003 ± 0.018	0.002 ± 0.068	0.001 ± 0.029	0.007 ± 0.016	0.001 ± 0.036	0.006 ± 0.101
Mn	0.004 ± 0.008	0.003 ± 0.030	0.004 ± 0.012	0.003 ± 0.007	0.007 ± 0.017	0.010 ± 0.046
Fe	0.052 ± 0.077	0.023 ± 0.076	0.047 ± 0.101	0.082 ± 0.103	0.046 ± 0.239	0.000 ± 1.300
Co	0.000 ± 0.020	0.000 ± 0.024	0.000 ± 0.026	0.000 ± 0.027	0.000 ± 0.062	0.000 ± 0.310
Ni	0.009 ± 0.008	0.015 ± 0.016	0.003 ± 0.008	0.011 ± 0.005	0.008 ± 0.011	0.022 ± 0.030
Cu	0.082 ± 0.061	0.079 ± 0.022	0.093 ± 0.104	0.117 ± 0.053	0.038 ± 0.009	0.212 ± 0.193
Zn	0.157 ± 0.051	0.100 ± 0.015	0.170 ± 0.076	0.155 ± 0.036	0.185 ± 0.036	0.266 ± 0.173
Ga	0.003 ± 0.009	0.006 ± 0.027	0.001 ± 0.016	0.004 ± 0.009	0.003 ± 0.020	0.039 ± 0.063
Ge	ND	ND	ND	ND	ND	ND
As	0.004 ± 0.012	0.006 ± 0.033	0.004 ± 0.021	0.004 ± 0.016	0.002 ± 0.027	0.023 ± 0.089
Se	0.003 ± 0.006	0.002 ± 0.017	0.002 ± 0.010	0.000 ± 0.005	0.006 ± 0.012	0.008 ± 0.035
Br	0.024 ± 0.011	0.019 ± 0.015	0.035 ± 0.015	0.017 ± 0.005	0.023 ± 0.011	0.051 ± 0.039
Rb	0.001 ± 0.005	0.001 ± 0.014	0.001 ± 0.016	0.000 ± 0.005	0.001 ± 0.010	0.000 ± 0.023
Sr	0.003 ± 0.004	0.005 ± 0.016	0.004 ± 0.007	0.000 ± 0.004	0.002 ± 0.009	0.019 ± 0.030
Y	0.001 ± 0.006	0.000 ± 0.019	0.002 ± 0.011	0.001 ± 0.006	0.001 ± 0.014	0.009 ± 0.039
Zr	0.002 ± 0.007	0.000 ± 0.023	0.000 ± 0.014	0.002 ± 0.007	0.003 ± 0.016	0.012 ± 0.040
Mo	0.012 ± 0.013	0.013 ± 0.040	0.010 ± 0.023	0.005 ± 0.013	0.019 ± 0.029	0.057 ± 0.094
Pd	0.016 ± 0.044	0.034 ± 0.136	0.000 ± 0.078	0.013 ± 0.043	0.022 ± 0.100	0.082 ± 0.287
Ag	0.010 ± 0.051	0.030 ± 0.154	0.016 ± 0.090	0.000 ± 0.049	0.000 ± 0.115	0.000 ± 0.310
Cd	0.006 ± 0.053	0.000 ± 0.164	0.007 ± 0.094	0.008 ± 0.052	0.007 ± 0.121	0.031 ± 0.337
In	0.020 ± 0.060	0.005 ± 0.185	0.045 ± 0.106	0.026 ± 0.059	0.000 ± 0.135	0.187 ± 0.388
Sn	0.009 ± 0.077	0.011 ± 0.238	0.012 ± 0.136	0.002 ± 0.075	0.012 ± 0.173	0.172 ± 0.509
Sb	0.009 ± 0.088	0.019 ± 0.270	0.011 ± 0.158	0.006 ± 0.086	0.004 ± 0.198	0.000 ± 0.550
Ba	0.283 ± 0.481	0.790 ± 1.086	0.085 ± 0.546	0.053 ± 0.302	0.374 ± 0.695	1.072 ± 1.991
La	0.220 ± 0.506	0.846 ± 1.279	0.218 ± 0.739	0.016 ± 0.403	0.007 ± 0.930	0.577 ± 2.562
Hg	0.001 ± 0.012	0.000 ± 0.037	0.000 ± 0.022	0.000 ± 0.012	0.004 ± 0.027	0.029 ± 0.082
Pb	0.103 ± 0.034	0.079 ± 0.047	0.095 ± 0.058	0.108 ± 0.030	0.120 ± 0.028	0.364 ± 0.069

**Tabla 32.** Perfiles de emisión de fuentes móviles en Imperial County (U.S.A.). ND = Valor no disponible. Perfiles obtenidos de Watson y Chow, 2001.

Especie	ICRSC	ICRSIC3	ICRSIC2	ICRSHC	ICRSBC
Cl <sup>-</sup>	1.764 ± 1.866	2.254 ± 1.589	1.087 ± 0.905	3.623 ± 2.435	0.753 ± 0.416
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	11.336 ± 11.799	13.678 ± 7.522	5.499 ± 7.503	24.279 ± 11.999	5.689 ± 3.892
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	4.549 ± 1.912	5.490 ± 0.851	3.263 ± 1.302	6.668 ± 1.653	4.039 ± 0.735
Na <sup>+</sup>	4.741 ± 4.496	4.963 ± 2.009	1.978 ± 2.37	8.789 ± 3.847	4.148 ± 4.853
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.810 ± 0.324	1.468 ± 0.924	0.925 ± 0.491	0.798 ± 0.212	0.677 ± 0.081
K <sup>+</sup>	1.349 ± 1.022	2.138 ± 0.627	1.637 ± 1.35	0.922 ± 0.273	1.418 ± 1.136
OC	45.82 ± 18.808	59.875 ± 12.406	35.675 ± 10.561	35.138 ± 11.136	69.182 ± 9.528
EC	17.449 ± 5.609	20.895 ± 5.58	14.604 ± 7.037	17.352 ± 4.425	21.102 ± 2.987
Na	ND	ND	ND	ND	ND
Mg	ND	ND	ND	ND	ND
Al	0.156 ± 0.583	0.198 ± 1.217	0.365 ± 0.713	0.051 ± 0.755	0.000 ± 1.491
Si	0.130 ± 1.608	0.000 ± 3.425	0.338 ± 1.99	0.000 ± 2.056	0.000 ± 4.109
P	0.108 ± 0.058	0.094 ± 0.107	0.065 ± 0.061	0.102 ± 0.111	0.167 ± 0.071
S	1.904 ± 0.652	2.823 ± 0.252	1.617 ± 0.589	2.449 ± 0.673	1.72 ± 0.452
Cl	2.130 ± 2.843	2.504 ± 3.355	2.533 ± 1.843	3.478 ± 4.529	0.279 ± 0.179
K	1.224 ± 1.527	1.912 ± 1.514	1.758 ± 2.342	1.006 ± 0.325	0.777 ± 1.051
Ca	0.069 ± 0.217	0.006 ± 0.499	0.000 ± 0.285	0.224 ± 0.27	0.000 ± 0.551
Ti	0.020 ± 0.123	0.001 ± 0.305	0.028 ± 0.16	0.013 ± 0.253	0.018 ± 0.237
V	0.012 ± 0.069	0.027 ± 0.176	0.012 ± 0.083	0.017 ± 0.149	0.006 ± 0.129
Cr	0.009 ± 0.019	0.006 ± 0.049	0.008 ± 0.022	0.014 ± 0.041	0.004 ± 0.034
Mn	0.006 ± 0.008	0.004 ± 0.022	0.009 ± 0.01	0.004 ± 0.018	0.007 ± 0.015
Fe	0.401 ± 0.58	0.419 ± 0.656	0.558 ± 0.475	0.488 ± 0.938	0.118 ± 0.116
Co	0.001 ± 0.013	0.000 ± 0.029	0.000 ± 0.018	0.001 ± 0.021	0.001 ± 0.031
Ni	0.004 ± 0.005	0.009 ± 0.012	0.002 ± 0.006	0.006 ± 0.009	0.004 ± 0.009
Cu	0.057 ± 0.063	0.035 ± 0.013	0.024 ± 0.010	0.119 ± 0.090	0.037 ± 0.008
Zn	0.140 ± 0.042	0.147 ± 0.016	0.117 ± 0.053	0.155 ± 0.034	0.154 ± 0.023
Ga	0.004 ± 0.009	0.000 ± 0.022	0.002 ± 0.012	0.005 ± 0.019	0.007 ± 0.017
Ge	ND	ND	ND	ND	ND
As	0.005 ± 0.012	0.002 ± 0.026	0.006 ± 0.014	0.003 ± 0.023	0.007 ± 0.024
Se	0.002 ± 0.006	0.004 ± 0.013	0.002 ± 0.007	0.002 ± 0.012	0.001 ± 0.011
Br	0.025 ± 0.016	0.027 ± 0.013	0.021 ± 0.009	0.044 ± 0.015	0.013 ± 0.009
Rb	0.001 ± 0.005	0.000 ± 0.011	0.001 ± 0.006	0.001 ± 0.01	0.001 ± 0.009
Sr	0.001 ± 0.004	0.000 ± 0.011	0.002 ± 0.005	0.001 ± 0.01	0.000 ± 0.008
Y	0.003 ± 0.006	0.004 ± 0.015	0.002 ± 0.008	0.006 ± 0.013	0.000 ± 0.012
Zr	0.003 ± 0.008	0.002 ± 0.018	0.005 ± 0.01	0.003 ± 0.016	0.002 ± 0.015
Mo	0.01 ± 0.013	0.017 ± 0.032	0.007 ± 0.017	0.009 ± 0.027	0.014 ± 0.025
Pd	0.018 ± 0.045	0.000 ± 0.106	0.026 ± 0.059	0.017 ± 0.091	0.008 ± 0.086
Ag	0.016 ± 0.051	0.017 ± 0.123	0.013 ± 0.067	0.014 ± 0.104	0.022 ± 0.099
Cd	0.042 ± 0.057	0.041 ± 0.131	0.019 ± 0.071	0.091 ± 0.111	0.023 ± 0.104
In	0.051 ± 0.061	0.045 ± 0.146	0.04 ± 0.081	0.044 ± 0.124	0.073 ± 0.118
Sn	0.010 ± 0.079	0.037 ± 0.188	0.000 ± 0.103	0.011 ± 0.161	0.022 ± 0.152
Sb	0.009 ± 0.09	0.000 ± 0.214	0.000 ± 0.118	0.029 ± 0.184	0.000 ± 0.172
Ba	0.144 ± 0.312	0.599 ± 0.938	0.161 ± 0.412	0.095 ± 0.635	0.172 ± 0.602
La	0.227 ± 0.422	0.667 ± 1.014	0.141 ± 0.555	0.307 ± 0.86	0.254 ± 0.811
Hg	0.001 ± 0.012	0.001 ± 0.03	0.001 ± 0.016	0.000 ± 0.025	0.000 ± 0.023
Pb	0.064 ± 0.062	0.06 ± 0.028	0.019 ± 0.02	0.092 ± 0.024	0.094 ± 0.098

#### 4.5. CORRELACIÓN OC/EC

El carbón elemental es emitido, directamente, de fuentes de combustión a la atmósfera, mientras que el carbón orgánico puede provenir de fuentes primarias y secundarias (Fang *et al.*, 2008). En este estudio se determinó la relación entre OC y EC de los gases de combustión de vehículos automotores, los cuales constituyen una fuente primaria de carbón orgánico. Utilizando los cambios de concentración entre la entrada y salida del túnel, y el volumen asociado, se calcularon las razones OC/EC para cada uno de los días de monitoreo. Estos resultados se encuentran en las Tablas 33 y 34.

**Tabla 33.** Relación de OC y EC (Corregido por blancos).

Fecha	Sentido	Tráfico	$\Delta$ OC ( $\mu$ g)	$\Delta$ EC ( $\mu$ g)	OC/EC
22/06/2009	1	Alto	19.3	5.8	3.3
23/06/2009	1	Alto	17.8	10.3	1.7
24/06/2009	1	Alto	17.3	6.0	2.9
25/06/2009	2	Alto	10.7	3.1	3.5
29/06/2009	2	Alto	V.D. <sup>a</sup>	1.1	N.C. <sup>b</sup>
30/06/2009	2	Alto	6.7	0.5	14.7
22/06/2009	1	Moderado	10.9	7.9	1.4
23/06/2009	1	Moderado	11.0	7.4	1.6
24/06/2009	1	Moderado	N.C. <sup>b</sup>	N.C. <sup>b</sup>	N.C. <sup>b</sup>
25/06/2009	2	Moderado	6.1	3.9	1.6
29/06/2009	2	Moderado	0.5	2.1	0.23
30/06/2009	2	Moderado	V.D. <sup>a</sup>	1.0	N.C. <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Valor descartado por ser negativo. <sup>b</sup> N.C. = valor no calculado.

**Tabla 34.** Relación OC/EC (Corregido por polvos resuspendidos).

Fecha	Sentido	Tráfico	$\Delta$ OC ( $\mu$ g)	$\Delta$ EC ( $\mu$ g)	OC/EC
22/06/2009	1	Alto	19.3	5.8	3.3
23/06/2009	1	Alto	17.8	10.3	1.7
24/06/2009	1	Alto	17.2	6.0	2.9
25/06/2009	2	Alto	10.7	3.1	3.5
29/06/2009	2	Alto	V.D. <sup>a</sup>	1.1	N.C. <sup>b</sup>
30/06/2009	2	Alto	6.7	0.5	14.7
22/06/2009	1	Moderado	10.7	7.8	1.4
23/06/2009	1	Moderado	11.8	7.3	1.6
24/06/2009	1	Moderado	13.2	7.8	1.7
25/06/2009	2	Moderado	N.C. <sup>b</sup>	N.C. <sup>b</sup>	N.C. <sup>b</sup>
29/06/2009	2	Moderado	0.5	2.1	0.2
30/06/2009	2	Moderado	V.D. <sup>a</sup>	1.0	N.C. <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Valor descartado por ser negativo. <sup>b</sup> N.C. = valor no calculado.

Con el propósito de realizar una comparación con resultados obtenidos en otros estudios, se estimaron los valores promedio para la razón OC/EC. En la Tabla 35 podemos observar que la proporción entre OC y EC fue entre 1.7 y 2.2 veces mayor en tráfico alto que para tráfico moderado. Esta diferencia pudiera ser causada por la velocidad de los vehículos y la manera en que se consume el combustible. En un tráfico moderado la velocidad tiende a ser mayor, por lo que el motor presenta mayores revoluciones y la mezcla aire-combustible es enriquecida en oxígeno, lo que disminuye la formación de EC y OC. Debido a lo anterior la proporción OC/EC es menor para tráfico moderado que para tráfico alto.

**Tabla 35.** Razones promedio OC/EC.

	Corrección por blancos	Corrección por Polvos
<b>Tráfico Alto</b>	2.85 ± 0.79	2.85 ± 0.79
<b>Tráfico Moderado</b>	1.20 ± 0.65	1.19 ± 0.65

De acuerdo a diferentes estudios la proporción OC/EC para fuentes móviles presenta valores típicos entre 1.0 y 3.0 (Fang *et al.*, 2008; Ma *et al.*, 2004; Laschober *et al.*, 2004; Gillies *et al.*, 2001; Watson y Chow, 2001). Con este rango y los valores obtenidos en el Túnel de la Loma Larga, podríamos decir que las emisiones de OC y EC provienen exclusivamente de una fuente primaria, como son las fuentes móviles (Subramanian *et al.*, 2006; Yu *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2000; Gray y Cass, 1998).

Para apoyar la relación existente entre el carbón orgánico y elemental, se determinaron los niveles de correlación entre estas dos especies. La corrección por polvos presentó una correlación de  $R = 0.842$  y  $R = 0.970$  para períodos de tráfico alto y moderado, respectivamente, mientras que la corrección por blancos mostró valores de  $R = 0.842$  y  $R = 0.972$ . Ambas correcciones generan resultados similares, sin embargo se aprecia una mejor correlación entre el OC y EC durante un tráfico moderado que durante un tráfico alto. Esta diferencia se puede deber al número pequeño de datos utilizados en la correlación lo que eleva la incertidumbre de esta evaluación. Sin embargo, también cabe señalar, que la proporción OC/EC presenta una mejor correlación para períodos de tráfico moderado que

tráfico alto, ya que durante los períodos de flujo moderado la velocidad de los vehículos tiende a ser constante, lo que genera una menor variabilidad de los datos. En las figuras 23 y 24 se muestra el comportamiento entre estas dos especies.

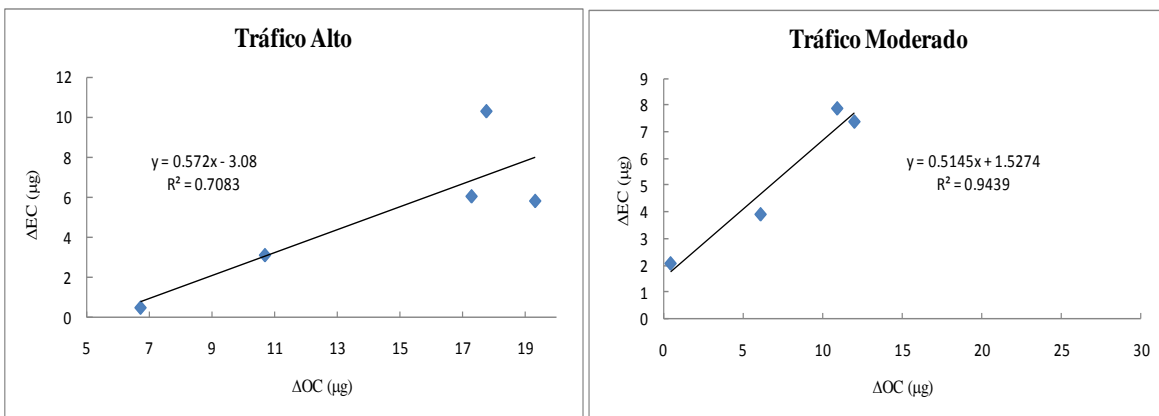


Figura 23. Correlación entre OC y EC (Corregido por blancos).

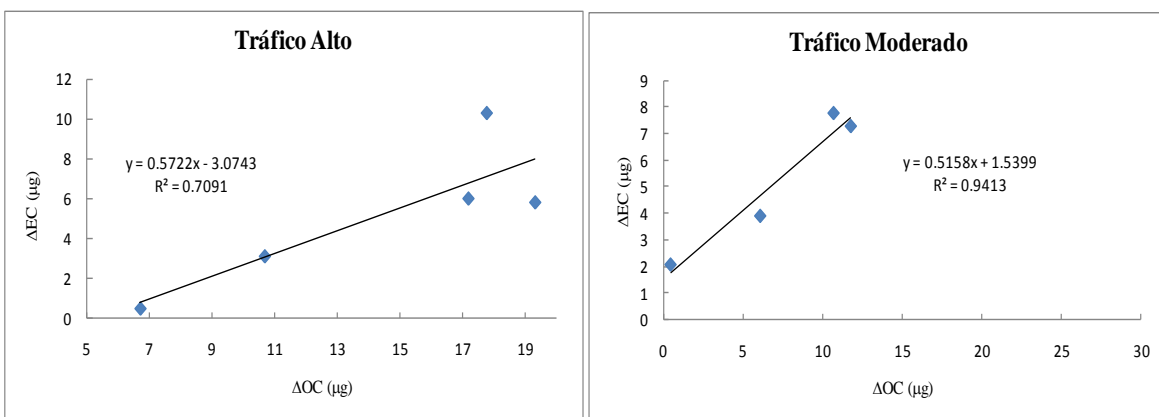


Figura 24. Correlación entre OC y EC (Corregido por polvos).



#### 4.6. EMISIONES DEL AMM

Con el objetivo de apoyar la congruencia de los factores de emisión de CO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub>, obtenidos en este estudio, se realizó una comparación con los factores de emisión estimados a partir del inventario de emisiones hecho en 2005 para fuentes móviles del AMM (Bautista *et al.*, 2008). Este inventario se enfocó a vehículos de trabajo ligero que utilizan gasolina como combustible considerando como año base 2005. Para el cálculo de los factores de emisión de fuentes móviles, correspondientes al inventario de 2005, se consideraron los valores citados en la Tabla 36.

**Tabla 36.** Valores de las variables utilizadas en el cálculo de factores de emisión de fuentes móviles en el año 2005.

<b>Resultados del Inventario de Emisiones para Fuentes Móviles (IEFM-2005)<sup>a</sup></b>	
Número total de vehículos en el AMM en 2005	1,305,443
Distancia recorrida promedio por vehículo, km/año	13,669
Rendimiento, km/L	9.5
Consumo de gasolina (calculado), L/ año-veh	1,445
Toneladas de CO <sub>2</sub> por año	4,415,129
Toneladas de PM <sub>2.5</sub> por año	173

<sup>a</sup> Bautista *et al.*, 2009

En la tabla anterior se consideran solamente las emisiones de vehículos particulares y de trabajo ligero, correspondientes a la clasificación vehicular empleada en el Túnel de la Loma Larga. Los modelos utilizados para la estimación de los factores de emisión fueron:

$$FE_k = \frac{(\text{Toneladas de CO}_2 \text{ ó PM}_{2.5}) \cdot 10^6}{N * D} \quad (4)$$

$$FE_c = \frac{(\text{Toneladas de CO}_2 \text{ ó PM}_{2.5}) \cdot 10^6}{N \cdot C} \quad (5)$$

donde  $FE_k$  corresponde al factor de emisión para CO<sub>2</sub> o PM<sub>2.5</sub> en g-veh<sup>-1</sup>-km<sup>-1</sup> y  $FE_c$  en g/L,  $N$ , el número total de vehículos en el AMM,  $D$ , la distancia promedio recorrida por un

vehículo en un año en kilómetros y,  $C$ , el consumo promedio de combustible de un vehículo por año en litros.

En la Tabla 37 se encuentran los resultados obtenidos para el inventario de emisiones de 2005, así como una comparación con los factores de emisión de fuentes vehiculares, obtenidos en el Túnel de la Loma Larga (TLL-2009).

**Tabla 37.** Comparación de factores de emisión de fuentes móviles.

Factor de emisión	IEFM-2005	TLL-2009
$FE_k \text{ CO}_2, \text{ g-veh}^{-1}\text{-km}^{-1}$	247	188
$FE_k \text{ PM}_{2.5}, \text{ g-veh}^{-1}\text{-km}^{-1}$	0.010	0.013
$FE_c \text{ CO}_2, \text{ g/L}$	2,340	2,012
$FE_c \text{ PM}_{2.5}, \text{ g/L}$	0.092	0.160

De la comparación de los resultados, de la Tabla 37, podemos observar que los factores de emisión promedio de  $\text{CO}_2$ , que se obtuvieron en el Túnel de la Loma Larga, son entre un 14% y 24% menores que los estimados para el IEFM-2005. Esta diferencia se atribuye al rendimiento de los vehículos, ya que en este estudio el rendimiento vehicular fue mayor (10.7 km/L) que el calculado para el IEFM-2005 (9.5 km/L). Explicado en otras palabras, al tener un mayor rendimiento, las emisiones de  $\text{CO}_2$  tienden a disminuir. En el caso de las  $\text{PM}_{2.5}$  se observó lo contrario que el  $\text{CO}_2$ . Los factores de emisión promedio obtenidos para  $\text{PM}_{2.5}$  en el TLL-2009 son entre un 37% y 75% mayores que los estimados para el IEFM-2005. Esto se puede deber a la contribución de los pocos vehículos de trabajo pesado y diesel que transitaron a través del túnel, durante la realización de este proyecto, ya que este tipo de vehículos no se consideran en los factores calculados para el IEFM-2005.

Es importante apuntar también que la diferencia entre estos resultados se debe a que el IEFM-2005 fue calculado con un *Software* de modelación de emisiones de vehículos (MOBILE6.2 México) y que los factores de emisión del Túnel de la Loma Larga son experimentales. También cabe aclarar que los factores de emisión generados a partir del MOBILE6.2 México consideran ciclos de manejo mucho más complejos que el presentado por los vehículos en el Túnel de la Loma Larga, en el cual los vehículos presentaron una

velocidad constante entre 43 km/hr y 76 km/hr. Además se debe estar conciente que los factores obtenidos en este estudio son principalmente representativos de las zonas circundantes al Túnel de la Loma Larga, en cambio los obtenidos en el MOBILE6.2 utilizan información específica de flotas vehiculares de los diferentes municipios que integran el AMM. Sin embargo, se reitera que el principal objetivo de esta comparación es observar si los resultados, aquí obtenidos, son coherentes en orden de magnitud.

Existe un estudio realizado en la ciudad de Monterrey en el que se estimaron factores de emisión de CO<sub>2</sub> para vehículos a velocidad constante y en condiciones reales de manejo (Hernández, 2009). Estas estimaciones se realizaron con un analizador de gases portátil en vehículos del AMM. Los factores de emisión promedio obtenidos en este estudio, que se menciona, se pueden apreciar en la Tabla 38.

**Tabla 38.** Factores de emisión de CO<sub>2</sub> para fuentes móviles del AMM (Hernandez, 2009).

Tipo gasolina	Emisiones para la prueba de velocidad constante		Emisiones en condiciones reales (ciudad)	
	FE (g-veh <sup>-1</sup> -km <sup>-1</sup> )	FE (g/L)	FE (g-veh <sup>-1</sup> -km <sup>-1</sup> )	FE (g/L)
Magna	277	2,413	241	2,420
Premium	277	2,423	236	2,140

De la tabla anterior podemos observar que los factores de emisión de CO<sub>2</sub> son entre un 20% y 32% mayores que los factores de emisión, por kilómetro recorrido, obtenidos en el Túnel de la Loma Larga (Tabla 37), y entre un 6% y 17% mayores que los factores de emisión en g/L. Estas diferencias se deben al rendimiento menor que presentaron los vehículos en el estudio de Hernandez, 2009 (entre 6.61 y 10.86 km/L para gasolina Magna y entre 7.28 y 10.15 km/L para Premium), que el estimado para los vehículos muestreados en el Túnel de la Loma Larga.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se mencionan las conclusiones obtenidas de la realización de este proyecto, a partir de los resultados logrados en base a los objetivos que se plantearon. Además, se resumen una serie de recomendaciones, con el objetivo de incrementar la confiabilidad de la datos de aquellos que realicen estudios similares, ya sea aquí, en el AMM, o en cualquier otro sitio.

#### 5.1. CONCLUSIONES

En este estudio se estimaron emisiones para fuentes móviles del AMM, a partir del muestreo una flota representativa, mediante mediciones en el Túnel de la Loma Larga. Estas emisiones corresponden al CO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub>, y los resultados obtenidos fueron:

- ◆ Emisiones de CO<sub>2</sub> de  $152 \pm 22$  g-veh<sup>-1</sup>-km<sup>-1</sup> y  $2,045 \pm 219$  g-L<sup>-1</sup> en el sentido de San Pedro a Monterrey (sentido 2).
- ◆ Emisiones de CO<sub>2</sub> de  $188 \pm 22$  g-veh<sup>-1</sup>-km<sup>-1</sup> y  $2,012 \pm 20$  g-L<sup>-1</sup> en el sentido de Monterrey a San Pedro (sentido 1).
- ◆ Emisiones de PM<sub>2.5</sub> de  $21.7 \pm 9.5$  g-veh<sup>-1</sup>-km<sup>-1</sup> y  $130 \pm 173$  g-L<sup>-1</sup> en el sentido de San Pedro a Monterrey.
- ◆ Emisiones de PM<sub>2.5</sub> de  $13.3 \pm 6.3$  g-veh<sup>-1</sup>-km<sup>-1</sup> y  $160 \pm 77$  g-L<sup>-1</sup> en el sentido de Monterrey a San Pedro.

Del resto de los resultados para el CO<sub>2</sub> podemos observar que:

- ◆ En función de la distancia recorrida, los vehículos emiten 20% más de CO<sub>2</sub> cuando circulan por una pendiente ascendente, debido a que el vehículo se encuentra en constante aceleramiento, lo que implica un mayor consumo de combustible.
- ◆ Se determinó que los vehículos del AMM, que se muestrearon, presentan un rendimiento promedio de 10.7 km/L.

- ◆ Las concentraciones de CO<sub>2</sub> tienen una dependencia cuadrática con respecto a la velocidad vehicular, en el intervalo de velocidades de 43 km/hr a 76 km/hr. En este rango las concentraciones de CO<sub>2</sub> disminuyen al incrementar la velocidad. El coeficiente de correlación de pearson,  $R$ , fue de 0.739.
- ◆ En el análisis de varianza realizado para los valores promedio de factores de emisión, no existe diferencia significativa entre los resultados obtenidos en ambos tubos del túnel. Se obtuvieron valores de  $p = 0.16$  y  $p = 0.66$  para los factores obtenidos en función de la distancia recorrida y combustible consumido, respectivamente. Utilizando un  $\alpha = 0.05$ , los valores  $p$  son mayores a este nivel de significancia, por lo que se concluye que los factores de emisión provienen de la misma flota vehicular.

En el caso de los resultados obtenidos para las emisiones de PM<sub>2.5</sub> podemos concluir que:

- ◆ Las emisiones de partículas finas, provenientes de fuentes móviles, están dominadas por carbón orgánico ( $55.2 \pm 2.8\%$ ) y carbón elemental ( $16.3 \pm 1.6\%$ ). En conjunto estas especies contribuyen  $71.5 \pm 3.3\%$  del total de PM<sub>2.5</sub> emitidos.
- ◆ Las emisiones de carbón orgánico y elemental provienen exclusivamente de fuentes primarias, es decir, fuentes móviles. Esto es apoyado por los valores de OC/EC de  $2.85 \pm 0.79$  y  $1.19 \pm 0.65$  obtenidos durante un tráfico alto y moderado, respectivamente. Y para los cuáles, el rango de la razón OC/EC para fuentes móviles, de acuerdo a diversos estudios, es de 1.0 a 3.0.
- ◆ Además, el OC y EC tienen una fuerte dependencia uno del otro, al presentar una correlación lineal de  $R = 0.842$  y  $R = 0.970$  durante períodos de tráfico alto y moderado, respectivamente.

En el aforo vehicular realizado en el Túnel de la Loma Larga, se muestrearon un total de 108, 569 vehículos, de los cuales podemos decir que:

- ◆ El 97% son autos particulares de pasajeros, incluidos: sedanes chicos y grandes, taxis, pick up y SUVs; 1.9% camiones, 1.5% autobuses y el resto motocicletas.

- ◆ El 56% corresponden a un flujo de tráfico alto y el 46 a un flujo moderado.
- ◆ Las velocidades promedio durante un tráfico alto son  $59 \pm 13$  km/hr y en moderado de  $48 \pm 3$  km/hr.

Considerando un recorrido promedio por vehículo de 13,669 km/año, una flota de aproximadamente 1,305,443 vehículos de pasajeros, al 2005, y un rendimiento de 9.5 km/L, se estimaron los factores de emisión de CO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub> a partir de los resultados obtenidos en un inventario de emisiones de fuentes móviles para el AMM. Para este cálculo se consideraron emisiones de 4,415,129 toneladas de CO<sub>2</sub> y 173 toneladas de PM<sub>2.5</sub>. A partir de esto concluimos que:

- ◆ Los factores de emisión de CO<sub>2</sub> en este estudio, son entre un 14% y 24% menores que los obtenidos en el IEFM-2005.
- ◆ Los factores de emisión de PM<sub>2.5</sub>, en este estudio, son entre un 37% y 74% mayores que los obtenidos en el IEFM-2005.
- ◆ Los factores de emisión obtenidos en este trabajo son coherentes en orden de magnitud con los factores de emisión generados por el MOBILE6.2 México.

Finalmente, podemos concluir que la técnica de mediciones en túneles, para la estimación de factores y perfiles de emisión, provenientes de fuentes vehiculares, puede generar resultados coherentes, complementarios y representativos para una flota vehicular característica de cualquier zona urbana, como lo fue en este estudio el AMM.

## 5.2. RECOMENDACIONES

En esta sección se exponen algunas recomendaciones orientadas a la práctica del experimento y su metodología. Entre ellas tenemos:

1. El conteo y clasificación de fuentes móviles, en este estudio, se realizó mediante la video-filmación del flujo vehicular. Sería conveniente contar con algún sistema alternativo que pudiera validar la información obtenida, como el uso de tubos neumáticos para la realización de aforos, los cuales son sensores de ejes que detectan el paso de vehículos en base al impulso de presión que se genera. Otra opción podrían ser los sensores piezoeléctricos, estos son sensores de ejes que permiten calcular la velocidad del vehículo y clasificarlo con precisión.
2. En el caso de las emisiones de  $PM_{2.5}$ , pudiera utilizarse otro equipo que permitiera validar las concentraciones determinadas, a partir de los análisis de los filtros de teflón y cuarzo, y de esa manera elevar la confiabilidad de los factores de emisión obtenidos.
3. Otra alternativa para la validación de las emisiones de  $PM_{2.5}$  podría ser el uso de equipos de monitoreo continuo, que proporcione datos de concentración en tiempo real. Algunos de estos equipos podrían ser el DATARAM 4, TEOM o DustTrak, ampliamente utilizados en el monitoreo de partículas suspendidas totales,  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{1.0}$  o fracciones de tamaño respirable.
4. Algo que podría ser complementario a la estimación de emisiones de  $PM_{2.5}$  sería la utilización de algún equipo que calcule la distribución del tamaño de partícula durante los intervalos de muestreo, con el objeto de estimar los perfiles de tamaño de partícula. Esto permitiría determinar que fracciones de tamaño dominan las emisiones de  $PM_{2.5}$ . Estas fracciones serían, obviamente, partículas menores e iguales a 2.5 micrómetros.

5. Utilizar alguna clase de trazador, como el SF<sub>6</sub>, para determinar una distribución uniforme de los contaminantes a lo largo del túnel, de tal manera que las concentraciones sean homogéneas en cada punto dentro del túnel. Esto ayudaría a minimizar los gradientes de concentraciones negativas entre la entrada y salida del túnel.
6. Utilizar los perfiles de emisión de fuentes móviles, generados en este estudio, en algún modelo receptor para la administración de la calidad del aire. Estos perfiles son representativos del AMM y podrían utilizarse en conjunto con perfiles de otras fuentes para determinar la contribución de cada una de estas a las emisiones registradas en algún sitio monitoreo.
7. Con base en el 71% de contribución de carbón total, en forma de PM<sub>2.5</sub>, convendría realizar estudios para caracterizar estas especies, ya que tienden a estar compuestos por hidrocarburos aromáticos policíclicos y otros compuestos secundarios que son de aún más dañinos. Además, se podría realizar una discriminación de la procedencia de OC y EC.



## CAPÍTULO 6

### REFERENCIAS

- Agencia de Protección al Medio Ambiente y Recursos Naturales. “Inventario de Emisiones Condensado del AMM año base 2005”. *Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA)*. México, Monterrey, N.L.
- Allen, J. O., Mayo, P. R., Hughes, L. S., Salmon, L. G., & Cass, G. R. (2001). Emissions of Size-Segregated Aerosols from On-Road Vehicles in the Caldecott Tunnel. *Environmental Science & Technology*, 35(21), 4189-4197.
- Araizaga, E. A. (2009). Tesis: “Estimación de factores de emisión de compuestos orgánicos volátiles provenientes de fuentes vehiculares a partir de mediciones en el Túnel de la Loma Larga del Área Metropolitana de Monterrey”. ITESM. Monterrey, N.L.
- Bautista Ramírez, M. A. (A), Reyna C., R. E., Mendoza D., A. (P), Mejía V., G. M. (P), (2008). The 2005 Mobile Sources emission inventory for the MMA. 101°. CONFERENCE OF AWMA. Internacional. Estados Unidos de América. Junio. 2008
- Beevers, S. D., & Carslaw, D. C. (2005). The impact of congestion charging on vehicle speed and its implications for assessing vehicle emissions. *Atmospheric Environment*, 39(36), 6875-6884.
- Branis, M., Safránek, J., & Hytychová, A. (2009). Exposure of children to airborne particulate matter of different size fractions during indoor physical education at school. *Building and Environment*, 44(6), 1246-1252.
- Bravo, H. A., y Torres, R. J. (2000). The usefulness of air quality monitoring and air quality impact studies before the introduction of reformulated gasolines in developing countries. Mexico City, a real case study. *Atmospheric Environment*, 34(3), 499-506.

- Cadle, S. H., Ayala, A., Black, K. N., Graze, R. R., Koupal, J., Minassian, F., Murray, Hannah B., Natarajan M., Tennant, C. J., Lawson, D. R. (2008). Real-World Vehicle Emissions: A Summary of the Seventeenth Coordinating Research Council On-Road Vehicle Emissions Workshop. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 58(1), 3.
- Cadle, S. H., Mulawa, P., Hunsanger, E.C., Nelson, K., Ragazzi, R. A., Barrett, R., Gallagher, G. L., Lawson, D. R., Knapp, K. T., Snow R. (1998). Measurements of Exhaust Particulate Matter Emissions from In-Use Light-Duty Motor Vehicles in the Denver, Colorado Area; Final Report for Coordinating Research Council Project E-24-1; *General Motors, Warren, MI*.
- Cadle, S. H., Mulawa, P. a., Ball, J., Donase, C., Weibel, A., Sagebiel, J. C., Knapp, K. T., y Snow, R. (1997). Particulate emission rates from in-use high emitting vehicles recruited in Orage County, California. *Enviro. Sci. Technol.*, 31, 3405-3412.
- Charron, A., y Harrison, R. M. (2003). Primary particle formation from vehicle emissions during exhaust dilution in the roadside atmosphere. *Atmospheric Environment*, 37(29), 4109-4119.
- Cheng, Y., Lee, S. C., Ho, K. F., & Louie, P. K. K. (2006). On-road particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) and gaseous emissions in the Shing Mun Tunnel, Hong Kong. *Atmospheric Environment*, 40(23), 4235-4245.
- Choi, J., Fuentes, M., & Reich, B. J. (2009). Spatial-temporal association between fine particulate matter and daily mortality. *Computational Statistics & Data Analysis*, 53(8), 2989-3000.

- Díaz, R. V., y Rosa Dominguez, E. (2009). Health risk by inhalation of PM<sub>2.5</sub> in the metropolitan zone of the City of Mexico. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 72(3), 866-871.
- El-Fadel, M., & Hashisho, Z. (2001). Vehicular emissions in roadway tunnels: A critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 31(2), 125.
- Fang, G.-C., Wu, Y.-S., Chou, T.-Y., & Lee, C.-Z. (2008). Organic carbon and elemental carbon in Asia: A review from 1996 to 2006. *Journal of Hazardous Materials*, 150(2), 231-237.
- Fraser, M. P., Cass, G. R., & Simoneit, B. R. T. (1998). Gas-Phase and Particle-Phase Organic Compounds Emitted from Motor Vehicle Traffic in a Los Angeles Roadway Tunnel. *Environmental Science & Technology*, 32(14), 2051-2060.
- Franklin, M., Zeka, A., y Schwartz, J. (2007). Association between PM<sub>2.5</sub> and all-cause and specific-cause mortality in 27 US communities. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 17(3), 279.
- Funasaka, K., Miyazaki, T., Kawaraya, T., Tsuruho, K., & Mizuno, T. (1998). Characteristics of particulates and gaseous pollutants in a highway tunnel. *Environmental Pollution*, 102(2-3), 171-176.
- Garg, B. D., Cadle, S. H., Mulawa, P. A., Groblicki, P. J., Laroo, C., & Parr, G. A. (2000). Brake Wear Particulate Matter Emissions. *Environmental Science & Technology*, 34(21), 4463-4469.
- Gertler, A. W. (2005). Diesel vs. gasoline emissions: Does PM from diesel or gasoline vehicles dominate in the US? *12th International Symposium, Transport and Air Pollution*, 39(13), 2349-2355.

- Gertler, A. W., Wittorff, D. N., McLaren, R., Belzer, W., & Dann, T. (1997). Characterization of vehicle emissions in Vancouver BC during the 1993 Lower Fraser Valley Oxidants Study. *The Lower Fraser Valley Oxidants/Pacific '93 Field Study*, 31(14), 2107-2112.
- Gillies, J. A., Gertler, A. W., Sagebiel, J. C., & Dippel, W. A. (2001). On-Road Particulate Matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>) Emissions in the Sepulveda Tunnel, Los Angeles, California. *Environmental Science & Technology*, 35(6), 1054-1063.
- Gray, H. A., y Cass, G. R. (1998). Source contributions to atmospheric fine carbon particle concentrations. *Atmospheric Environment*, 32(22), 3805-3825.
- Grosjean, D., Grosjean, E., & Gertler, A. W. (2001). On-Road Emissions of Carbonyls from Light-Duty and Heavy-Duty Vehicles. *Environmental Science & Technology*, 35(1), 45-53.
- Hernández, J. (2009). Tesis: Análisis de emisiones producidas por el uso de mezclas etanol-gasolina en vehículos del área metropolitana de Monterrey. ITESM. Monterrey, N.L.
- Hwa, M.-Y., Hsieh, C.-C., Wu, T.-C., & Chang, L.-F. W. (2002). Real-world vehicle emissions and VOCs profile in the Taipei tunnel located at Taiwan Taipei area. *Atmospheric Environment*, 36(12), 1993-2002.
- INE y SEMARNAT (1999). Inventario Nacional de Emisiones de México, 1999. México.
- Jamriska, M., Morawska, L., Thomas, S., & He, C. (2004). Diesel Bus Emissions Measured in a Tunnel Study. *Environmental Science & Technology*, 38(24), 6701-6709.
- Katsouyanni, K. (2003). Ambient air pollution and health. *British medical bulletin*, 68(1), 143.

- Kim, Y. P., Moon, K. C., & Hoon Lee, J. (2000). Organic and elemental carbon in fine particles at Kosan, Korea. *Atmospheric Environment*, 34(20), 3309-3317.
- Kirchstetter, T. W., Harley, R. A., Kreisberg, N. M., Stolzenburg, M. R., y Hering, S. V. (1999). On-road measurement of fine particle and nitrogen oxide emissions from light- and heavy-duty motor vehicles. *Atmospheric Environment*, 33(18), 2955-2968.
- Kristensson, A., Johansson, C., Westerholm, R., Swietlicki, E., Gidhagen, L., Wideqvist, U., et al. (2004). Real-world traffic emission factors of gases and particles measured in a road tunnel in Stockholm, Sweden. *Atmospheric Environment*, 38(5), 657-673.
- Laschober, C., Limbeck, A., Rendl, J., & Puxbaum, H. (2004). Particulate emissions from on-road vehicles in the Kaisermuhlen-tunnel (Vienna, Austria). *Atmospheric Environment*, 38(14), 2187-2195.
- Legreid, G., Reimann, S., Steinbacher, M., Staehelin, J., Young, D., & Stemmler, K. (2007). 'Measurements of OVOCs and NMHCs in a Swiss Highway Tunnel for Estimation of Road Transport Emissions. *Environmental Science & Technology*, 41(20), 7060-7066.
- Lough, Glynis C., Schauer, James J., Park, June-Soo, Shafer, Martin M., Deminter, Jeffrey T. y Weinstein, Jason P. (2005). Emissions of metals associated with motor vehicle roadways. *Environmental Science & Technology*, 39(3), 826-836.
- Ma, C.-J., Tohno, S., y Kasahara, M. (2004). A case study of the single and size-resolved particles in roadway tunnel in Seoul, Korea. *Contains Special Issue section on Measuring the composition of Particulate Matter in the EU*, 38(38), 6673-6677.

- Machado, A., García, N., García, C., Acosta, L., Córdoba, A., Linares, M., et al. (2008). CONTAMINACIÓN POR METALES (Pb, Zn, Ni y Cr) EN AIRE, SEDIMENTOS VIALES Y SUELO EN UNA ZONA DE ALTO TRÁFICO VEHICULAR. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 24, 171-182.
- Martins, L. D., Andrade, M. F., Freitas, E. D., Pretto, A., Gatti, L. V., Albuquerque, E. L., et al. (2006). Emission Factors for Gas-Powered Vehicles Traveling Through Road Tunnels in São Paulo, Brazil. *Environmental Science & Technology*, 40(21), 6722-6729.
- McGaughey, G. R., Desai, N. R., Allen, D. T., Seila, R. L., Lonneman, W. A., Fraser, M. P., et al. (2004). Analysis of motor vehicle emissions in a Houston tunnel during the Texas Air Quality Study 2000. *Findings from EPA's Particulate Matter Supersites Program*, 38(20), 3363-3372.
- McKinley, G., Zuk, M., Hojer, M., Avalos, M., Gonzalez, I., Iniestra, R., et al. (2005). Quantification of Local and Global Benefits from Air Pollution Control in Mexico City. *Environmental Science & Technology*, 39(7), 1954-1961.
- Metz, N. (1993). Emission characteristics of different combustion engines in the city, on rural roads and on highways. *Sci. Total Environ.*, 134, 225-235.
- Norbeck, J. M., Durbin, T. D., Truex, T. J. Measurement of Primary Particulate Matter Emissions from Light-Duty Motor Vehicles. (1998). Final Report for Coordinating Research Council Project E-24-2. *University of California, Riverside, CA*.
- Pardo, E. (2005). Tesis: Estudio de las partículas PM<sub>2.5</sub> en el aire ambiente de Mexicali, B.C. durante el otoño de 2004. ITESM. Monterrey, N.L.
- Pierson, W. R., Gertler, A. W., Robinson, N. F., Sagebiel, J. C., Zielinska, B., Bishop, G. A., et al. (1996). Real-world automotive emissions--Summary of studies in the Fort

- McHenry and Tuscarora mountain tunnels. *A WMA International Specialty Conference on Regional Photochemical Measurements and Modeling*, 30(12), 2233-2256.
- Riciardelli, A., Sheehan, P., & GeoEnvironmental Inc. (2006). Bioremediation of Fuel Oil Cape Cod Air Force Station Sagamore, Massachusetts. Reporte
- Riveros, H.G., Arriaga, J.L., Tejeda, J., Julián-Sánchez, A., Riveros-Rosas, H. (1998). Ozone and its precursors in the atmosphere of Mexico City. *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 48:866-871.
- Rogak, S. N., Green, S. I., Robin, C. (1994). A study of vehicle emissions in a traffic tunnel in Vancouver, BC. Presented at the *Annual Meeting Pacific Northwest Chapter Air Waste Manage. Assoc.*, Eugene, Oregon.
- Rogak, S. N., Pott, U., Campbell, J. L., y Nejedly, Z. (1997). Fine particle emissions from heavy-duty vehicles in Vancouver, BC. *AWMA 90<sup>th</sup> Annual Meeting*, 97-WP96.02, Toronto, Canada.
- Sagebiel, J. C., Zielinska, B., Walsh, P., Chow, J. C., Cadle, S. H., Mulawa, P. A., Knapp, K. T., Zweidinger, R. B., y Snow, R. (1997). PM-10 exhaust samples collected during IM-240 dynamometer tests of in-service vehicles in Nevada. *Environ. Sci. Technol.*, 31, 75-83.
- Salcedo, D., Onasch, T. B., Dzepina, K., Canagaratna, M. R., Zhang, Q., Huffman, J. A., et al. (2006). Characterization of ambient aerosols in Mexico City during the MCMA-2003 campaign with Aerosol Mass Spectrometry: results from the CENICA Supersite. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 925–946.
- Schifter, I., Diaz, L., Lopez-Salinas, E., Ramos, F., Avalos, S., Lopez-Vidal, G., et al. (2000). Estimation of Motor Vehicle Toxic Emissions in the Metropolitan Area of Mexico City. *Environmental Science & Technology*, 34(17), 3606-3610.

- Schifter, I., Diaz, L., Vera, M., Castillo, M., Ramos, F., Avalos, S., et al. (2000). Impact of Engine Technology on the Vehicular Emissions in Mexico City. *Environmental Science & Technology*, 34(13), 2663-2667.
- Schmid, H., Pucher, E., Ellinger, R., Biebl, P., & Puxbaum, H. (2001). Decadal reductions of traffic emissions on a transit route in Austria - results of the Tauerntunnel experiment 1997. *Atmospheric Environment*, 35(21), 3585-3593.
- Seinfeld, J.H. y Pandis, S. N. (2006). Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. *Wiley, John & Sons, Incorporated*.
- Song, Z., You, M., & Duzgoren-Aydin, N. S. (2005). Characterization of particulate organics accumulated on the ceiling of vehicular tunnels in Hong Kong and Guangzhou, China. *Atmospheric Environment*, 39(34), 6398-6408.
- Stemmler, K., O'Doherty, S., Buchmann, B., & Reimann, S. (2004). Emissions of the Refrigerants HFC-134a, HCFC-22, and CFC-12 from Road Traffic: Results from a Tunnel Study (Gubrist Tunnel, Switzerland). *Environmental Science & Technology*, 38(7), 1998-2004.
- Subramanian, R., Donahue, N. M., Bernardo-Bricker, A., Rogge, W. F., & Robinson, A. L. (2006). Contribution of motor vehicle emissions to organic carbon and fine particle mass in Pittsburgh, Pennsylvania: Effects of varying source profiles and seasonal trends in ambient marker concentrations. *Atmospheric Environment*, 40(40), 8002-8019.
- Touaty, M., & Bonsang, B. (2000). Hydrocarbon emissions in a highway tunnel in the Paris area. *Atmospheric Environment*, 34(6), 985-996.
- U.S. EPA. (2005). Emission Facts: Average Carbon Dioxide Emissions Resulting from Gasoline and Diesel Fuel. <http://www.epa.gov/oms/climate/420f05001.htm>



- U.S. EPA (2009). Emission Factors y AP 42. <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/>
- Valiulis, D., Ceburnis, D., Sakalys, J., & Kvietkus, K. (2002). Estimation of atmospheric trace metal emissions in Vilnius City, Lithuania, using vertical concentration gradient and road tunnel measurement data. *Atmospheric Environment*, 36(39-40), 6001-6014.
- Vega, E., Mugica, V., Reyes, E., Sánchez, G., Chow, J. C., & Watson, J. G. (2001). Chemical composition of fugitive dust emitters in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 35(23), 4033-4039.
- Vega, E., Mugica A., V., Díaz G., L., & Ramos L., F. (2000). Comparación de perfiles de emisiones vehiculares en túnel y en dinamómetro. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 16, 55.
- Villarreal H., 2008. Comunicación Personal. Consejo Estatal de Transporte y Vialidad del Estado de Nuevo León.
- Watson, J. G., y Chow, J. C. (2001). Source characterization of major emission sources in the Imperial and Mexicali Valleys along the US/Mexico border. *The Science of The Total Environment*, 276(1-3), 33-47.
- Weingartner, E., Keller, C., Stahel, W. A., Burtscher, H., & Baltensperger, U. (1997). Aerosol emission in a road tunnel. *Atmospheric Environment*, 31(3), 451-462.
- West, J. J., Osnaya, P., Laguna, I., Martinez, J., & Fernandez, A. (2004). Co-control of Urban Air Pollutants and Greenhouse Gases in Mexico City. *Environmental Science & Technology*, 38(13), 3474-3481.

- Wittorf, D.N., Barnard, W. R., Jongedyk, H. A., Gertler, A. W., y Chow, J. C. (1994). The impact of diesel particulate emissions on ambient particulate loadings. *AWMA 87<sup>th</sup> Annual Meeting*. 94-WP91.01, Cincinnati.
- Yu, S., Dennis, R. L., Bhave, P. V., & Eder, B. K. (2004). Primary and secondary organic aerosols over the United States: estimates on the basis of observed organic carbon (OC) and elemental carbon (EC), and air quality modeled primary OC/EC ratios. *Atmospheric Environment*, 38(31), 5257-5268.
- Zavala, M., Herndon, S. C., Slott, R. S., Dunlea, E. J., C., M. L., Shorter, J. H., et al. (2006). Characterization of on-road vehicle emissions in the Mexico City Metropolitan Area using a mobile laboratory in chase and fleet average measurement modes during the MCMA-2003 field campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 5129–5142.
- Zhu, Y., Hinds, W. C., Kim, S., Shen, S., & Sioutas, C. (2002). Study of ultrafine particles near a major highway with heavy-duty diesel traffic. *Atmospheric Environment*, 36(27), 4323-4335.

## ANEXOS

### A. Imágenes de los equipos utilizados en el Túnel de la Loma Larga.



Figura A1. Tripie para muestreador de bajo volumen (MiniVol).



Figura A2. Muestreadores de bajo volumen en el punto medio del túnel.

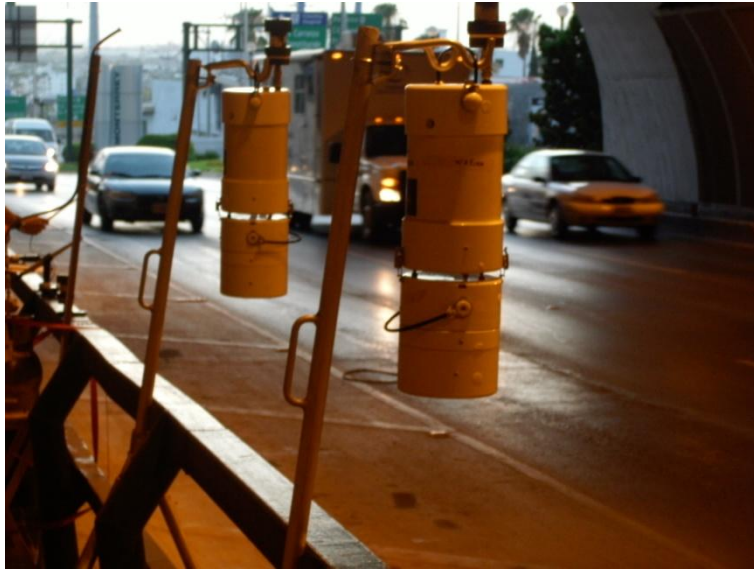


Figura A3. Muestreadores de bajo volumen en la entrada del túnel.



Figura A4. Minivols.

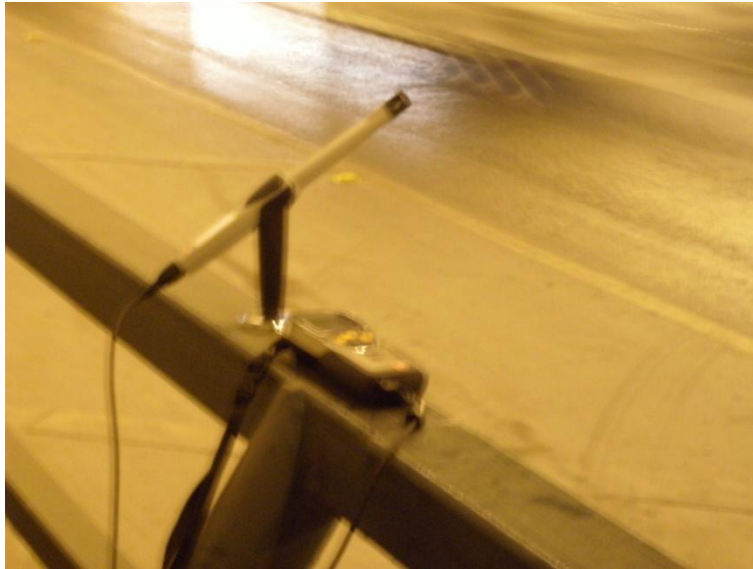


Figura A5. Medidor de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).



Figura A6. Cámara de video para aforo vehicular.



Figura A7. Cámara digital para velocidad de vehículos.



Figura A8. Cámara de resuspensión de polvos.

## B. Concentraciones de TNMHC y CO (Araizaga, 2009)

$\Delta[\text{CO}]$ , mg/m <sup>3</sup>	$\Delta[\text{TNMHC}]$ , mg/m <sup>3</sup>
9.4043 ± 4.6707	0.5642 ± 0.0086
11.3466 ± 6.3997	0.3724 ± 0.0086
9.1689 ± 3.6401	-0.0188 ± 0.0086
8.9689 ± 4.8384	1.2111 ± 0.0086
9.8664 ± 3.4281	0.6733 ± 0.0086
6.6979 ± 3.7368	1.3616 ± 0.0086
21.9796 ± 18.1524	1.3917 ± 0.0015
4.8232 ± 2.4652	-0.2294 ± 0.0015
7.7710 ± 4.6162	-0.4433 ± 0.0015
4.3537 ± 1.8883	-0.6797 ± 0.0015
6.1930 ± 3.2328	0.4513 ± 0.0015
3.4110 ± 1.7314	2.0010 ± 0.0015

## C. Propiedades físicas registradas en el Túnel de la Loma Larga.

Tráfico Alto						
Fecha	Entrada			Salida		
	P (mmHg)	T (oC)	%HR	P (mmHg)	T (oC)	%HR
22-jun-09	715.62 ± 0.43	19.02 ± 0.36	57.11 ± 1.33	715.90 ± 0.27	20.24 ± 0.37	52.31 ± 1.17
23-jun-09	715.93 ± 0.18	19.08 ± 0.47	56.04 ± 2.12	716.13 ± 0.15	20.33 ± 0.53	51.17 ± 1.98
24-jun-09	717.15 ± 0.22	19.37 ± 0.48	60.22 ± 2.22	717.25 ± 0.28	20.44 ± 0.49	55.80 ± 2.01
25-jun-09	714.04 ± 0.29	26.25 ± 1.11	30.13 ± 3.26	714.27 ± 0.42	26.60 ± 1.10	29.83 ± 3.01
29-jun-09	712.24 ± 0.41	25.31 ± 0.41	27.40 ± 0.75	712.83 ± 0.11	25.45 ± 0.34	27.31 ± 0.71
30-jun-09	712.66 ± 0.36	23.50 ± 0.62	32.23 ± 2.72	713.44 ± 0.31	24.10 ± 0.70	31.09 ± 2.60

Tráfico Moderado						
Fecha	Entrada			Salida		
	P (mmHg)	T (oC)	%HR	P (mmHg)	T (oC)	%HR
22-jun-09	715.80 ± 0.34	22.80 ± 1.38	38.91 ± 6.71	715.69 ± 0.48	23.17 ± 1.21	37.98 ± 6.00
23-jun-09	716.36 ± 0.30	22.36 ± 0.66	43.41 ± 2.26	716.29 ± 0.28	22.87 ± 0.57	42.03 ± 1.90
24-jun-09	717.82 ± 0.27	20.98 ± 0.64	53.30 ± 4.84	717.81 ± 0.37	21.76 ± 0.49	50.59 ± 4.20
25-jun-09	716.78 ± 0.28	21.49 ± 0.57	49.17 ± 2.23	717.93 ± 0.31	21.99 ± 0.45	47.63 ± 1.79
29-jun-09	714.97 ± 0.12	23.07 ± 0.96	37.82 ± 2.77	714.96 ± 0.05	23.49 ± 0.85	36.78 ± 2.34
30-jun-09	713.10 ± 0.65	22.79 ± 1.14	45.54 ± 3.46	714.16 ± 0.23	23.19 ± 0.82	44.27 ± 2.54

## B. Concentraciones de TNMHC y CO (Araizaga, 2009)

$\Delta[\text{CO}]$ , mg/m <sup>3</sup>	$\Delta[\text{TNMHC}]$ , mg/m <sup>3</sup>
9.4043 ± 4.6707	0.5642 ± 0.0086
11.3466 ± 6.3997	0.3724 ± 0.0086
9.1689 ± 3.6401	-0.0188 ± 0.0086
8.9689 ± 4.8384	1.2111 ± 0.0086
9.8664 ± 3.4281	0.6733 ± 0.0086
6.6979 ± 3.7368	1.3616 ± 0.0086
21.9796 ± 18.1524	1.3917 ± 0.0015
4.8232 ± 2.4652	-0.2294 ± 0.0015
7.7710 ± 4.6162	-0.4433 ± 0.0015
4.3537 ± 1.8883	-0.6797 ± 0.0015
6.1930 ± 3.2328	0.4513 ± 0.0015
3.4110 ± 1.7314	2.0010 ± 0.0015

## C. Propiedades físicas registradas en el Túnel de la Loma Larga.

Tráfico Alto						
Fecha	Entrada			Salida		
	P (mmHg)	T (oC)	%HR	P (mmHg)	T (oC)	%HR
22-jun-09	715.62 ± 0.43	19.02 ± 0.36	57.11 ± 1.33	715.90 ± 0.27	20.24 ± 0.37	52.31 ± 1.17
23-jun-09	715.93 ± 0.18	19.08 ± 0.47	56.04 ± 2.12	716.13 ± 0.15	20.33 ± 0.53	51.17 ± 1.98
24-jun-09	717.15 ± 0.22	19.37 ± 0.48	60.22 ± 2.22	717.25 ± 0.28	20.44 ± 0.49	55.80 ± 2.01
25-jun-09	714.04 ± 0.29	26.25 ± 1.11	30.13 ± 3.26	714.27 ± 0.42	26.60 ± 1.10	29.83 ± 3.01
29-jun-09	712.24 ± 0.41	25.31 ± 0.41	27.40 ± 0.75	712.83 ± 0.11	25.45 ± 0.34	27.31 ± 0.71
30-jun-09	712.66 ± 0.36	23.50 ± 0.62	32.23 ± 2.72	713.44 ± 0.31	24.10 ± 0.70	31.09 ± 2.60

Tráfico Moderado						
Fecha	Entrada			Salida		
	P (mmHg)	T (oC)	%HR	P (mmHg)	T (oC)	%HR
22-jun-09	715.80 ± 0.34	22.80 ± 1.38	38.91 ± 6.71	715.69 ± 0.48	23.17 ± 1.21	37.98 ± 6.00
23-jun-09	716.36 ± 0.30	22.36 ± 0.66	43.41 ± 2.26	716.29 ± 0.28	22.87 ± 0.57	42.03 ± 1.90
24-jun-09	717.82 ± 0.27	20.98 ± 0.64	53.30 ± 4.84	717.81 ± 0.37	21.76 ± 0.49	50.59 ± 4.20
25-jun-09	716.78 ± 0.28	21.49 ± 0.57	49.17 ± 2.23	717.93 ± 0.31	21.99 ± 0.45	47.63 ± 1.79
29-jun-09	714.97 ± 0.12	23.07 ± 0.96	37.82 ± 2.77	714.96 ± 0.05	23.49 ± 0.85	36.78 ± 2.34
30-jun-09	713.10 ± 0.65	22.79 ± 1.14	45.54 ± 3.46	714.16 ± 0.23	23.19 ± 0.82	44.27 ± 2.54



#### D. Descripción de Perfiles de Mexicali e Imperial County (Watson et al., 2001).

Perfil	Tamaño de fracción	Tipo de fuente	Descripción
IMRSCC2	PM <sub>2.5</sub>	Gases de combustión de vehículos de motor.	Dos muestras tomadas en el aeropuerto de Mexicali.
IMRSIC	PM <sub>2.5</sub>	Gases de combustión de vehículos de motor.	Tres muestras tomadas en la intersección de Independencia y López en Mexicali, Baja California.
IMRSEC	PM <sub>2.5</sub>	Gases de combustión de vehículos de motor.	Tres muestras tomadas en la intersección de la 11th y Lázaro Cárdenas cerca del sitio de monitoreo de Mexicali.
IMRSJC	PM <sub>2.5</sub>	Gases de combustión de vehículos de motor.	Tres muestras tomadas en la intersección de Justo Sierra y Lázaro cerca de la autopista 2 al sureste de Mexicali.
IMRSUC	PM <sub>2.5</sub>	Gases de combustión de vehículos de motor.	Tres muestras tomadas en la intersección de Urbano Vázquez y López en Mexicali.
ICRSC	PM <sub>2.5</sub>	Gases de combustión de vehículos de motor.	Trece muestras de gases de combustión de vehículos de Imperial County.
IMRSC	PM <sub>2.5</sub>	Gases de combustión de vehículos de motor.	Once muestras de gases de combustión de vehículos de Mexicali.
ICRSIC3	PM <sub>2.5</sub>	Gases de combustión de vehículos de motor.	Tres muestras de la intersección de Imperial Av. Y Adams en El Centro, CA (Pb alto).
ICRSIC2	PM <sub>2.5</sub>	Gases de combustión de vehículos de motor.	Cinco muestras tomadas de la intersección de Imperial Av. Y Adams en El Centro, (Pb normal)
ICRSHC	PM <sub>2.5</sub>	Gases de combustión de vehículos de motor.	Cuatro muestras tomadas cerca de la frontera entre México y U.S.A.
ICRSBC	PM <sub>2.5</sub>	Gases de combustión de vehículos de motor.	Cuatro muestras tomadas cerca de la frontera entre México y U.S.A.

## E. Resultados crudos enviados por ChesterLab.

### ITESM Gravimetric Data

Lab ID	Client ID	Site	Sample Date	Particle Size	Tare Wt.(mg)	Gross Wt.(mg)	Net Wt.(µg)	Volume (m³)	Concentration (µg/m³)	Comments
09-T2342	E1-01ALTA-T	Tunel	22/06/2009	PM2.5	150.373	150.402	29	1.103	26.29	
09-T2343	S1-01ALTA-T	Tunel	22/06/2009	PM2.5	146.47	146.508	38	1.106	34.36	
09-T2344	E1-01MOD-T	Tunel	22/06/2009	PM2.5	150.62	150.651	31	1.112	27.88	
09-T2345	S1-01MOD-T	Tunel	22/06/2009	PM2.5	147.999	148.051	52	1.113	46.72	
09-T2346	E1-02ALTA-T	Tunel	23/06/2009	PM2.5	149.373	149.391	18	1.103	16.32	
09-T2347	S1-02ALTA-T	Tunel	23/06/2009	PM2.5	145.872	145.919	47	1.106	42.50	
09-T2348	E1-02MOD-T	Tunel	23/06/2009	PM2.5	145.439	145.474	35	1.111	31.50	
09-T2349	S1-02MOD-T	Tunel	23/06/2009	PM2.5	147.975	148.014	39	1.112	35.07	
09-T2350	E1-03ALTA-T	Tunel	24/06/2009	PM2.5	150.755	150.794	39	1.104	35.33	
09-T2351	S1-03ALTA-T	Tunel	24/06/2009	PM2.5	149.043	149.091	48	1.077	44.57	
09-T2352	E1-03MOD-T	Tunel	24/06/2009	PM2.5	149.831	149.876	45	1.108	40.61	
09-T2353	S1-03MOD-T	Tunel	24/06/2009	PM2.5	148.98	148.998	18			
09-T2354	E2-01ALTA-T	Tunel	25/06/2009	PM2.5	146.636	146.681	45	0.8320	54.09	
09-T2355	S2-01ALTA-T	Tunel	25/06/2009	PM2.5	146.587	146.62	33	0.8328	39.63	
09-T2356	E2-01MOD-T	Tunel	25/06/2009	PM2.5	147.809	147.836	27	0.8403	32.13	
09-T2357	S2-01MOD-T	Tunel	25/06/2009	PM2.5	148.348	148.388	40	0.8414	47.54	
09-T2358	E2-02ALTA-T	Tunel	29/06/2009	PM2.5	147.886	147.941	55	0.8390	65.55	
09-T2359	S2-02ALTA-T	Tunel	29/06/2009	PM2.5	150.077	150.108	31	0.8393	36.94	
09-T2360	E2-02MOD-T	Tunel	29/06/2009	PM2.5	147.337	147.369	32	0.8348	38.33	
09-T2361	S2-02MOD-T	Tunel	29/06/2009	PM2.5	147.948	148.035	87	0.8355	104.13	
09-T2362	E2-03ALTA-T	Tunel	30/06/2009	PM2.5	148.179	148.212	33	0.8360	39.47	
09-T2363	S2-03ALTA-T	Tunel	30/06/2009	PM2.5	148.277	148.314	37	0.8368	44.22	
09-T2364	E2-03MOD-T	Tunel	30/06/2009	PM2.5	149.179	149.214	35	0.8322	42.06	
09-T2365	S2-03MOD-T	Tunel	30/06/2009	PM2.5	145.37	145.406	36	0.8351	43.11	
09-T2366	BLANCO1-T	Tunel	22/06/2009	PM2.5	147.638	147.645	7			
09-T2367	BLANCO2-T	Tunel	23/06/2009	PM2.5	149.687	149.704	17			
09-T2368	POLVMTY-T	Tunel	30/06/2009	PM2.5	148.647	149.84	1193			Debris in Slide
09-T2369	POLVSP-T	Tunel	30/06/2009	PM2.5	145.962	152.327	6365			Debris in Slide
09-T2370	POLV1-T	Tunel	27/06/2009	PM2.5	146.516	185.134	38618			Debris in Slide loose deposit
09-T2371	POLV2-T	Tunel	30/06/2009	PM2.5	147.728	163.171	15443			Debris in Slide

## Filtros de Teflón

Lab ID	Client ID	Site	Sample Date	Part. Size	Comments	Deposit Area	Net Mass	Net Unc.	Volume	Volume Unc.
09-T2342	E1-01ALTA-T	Tunel	22/06/2009	PM2.5		11.3	29	10	1.103	0.1100
09-T2343	S1-01ALTA-T	Tunel	22/06/2009	PM2.5		11.3	38	10	1.106	0.1110
09-T2344	E1-01MOD-T	Tunel	22/06/2009	PM2.5		11.3	31	10	1.112	0.1110
09-T2345	S1-01MOD-T	Tunel	22/06/2009	PM2.5		11.3	52	10	1.113	0.1110
09-T2346	E1-02ALTA-T	Tunel	23/06/2009	PM2.5		11.3	18	10	1.103	0.1100
09-T2347	S1-02ALTA-T	Tunel	23/06/2009	PM2.5	NUD-Zn	11.3	47	10	1.106	0.1110
09-T2348	E1-02MOD-T	Tunel	23/06/2009	PM2.5		11.3	35	10	1.111	0.1110
09-T2349	S1-02MOD-T	Tunel	23/06/2009	PM2.5		11.3	39	10	1.112	0.1110
09-T2350	E1-03ALTA-T	Tunel	24/06/2009	PM2.5		11.3	39	10	1.104	0.1100
09-T2351	S1-03ALTA-T	Tunel	24/06/2009	PM2.5		11.3	48	10	1.077	0.1080
09-T2352	E1-03MOD-T	Tunel	24/06/2009	PM2.5		11.3	45	10	1.108	0.1110
09-T2353	S1-03MOD-T	Tunel	24/06/2009	PM2.5		11.3	18	10		
09-T2354	E2-01ALTA-T	Tunel	25/06/2009	PM2.5		11.3	45	10	0.832	0.0830
09-T2355	S2-01ALTA-T	Tunel	25/06/2009	PM2.5		11.3	33	10	0.8328	0.0830
09-T2356	E2-01MOD-T	Tunel	25/06/2009	PM2.5		11.3	27	10	0.8403	0.0840
09-T2357	S2-01MOD-T	Tunel	25/06/2009	PM2.5		11.3	40	10	0.8414	0.0840
09-T2358	E2-02ALTA-T	Tunel	29/06/2009	PM2.5		11.3	55	10	0.839	0.0840
09-T2359	S2-02ALTA-T	Tunel	29/06/2009	PM2.5		11.3	31	10	0.8393	0.0840
09-T2360	E2-02MOD-T	Tunel	29/06/2009	PM2.5		11.3	32	10	0.8348	0.0830
09-T2361	S2-02MOD-T	Tunel	29/06/2009	PM2.5		11.3	87	10	0.8355	0.0840
09-T2362	E2-03ALTA-T	Tunel	30/06/2009	PM2.5		11.3	33	10	0.836	0.0840
09-T2363	S2-03ALTA-T	Tunel	30/06/2009	PM2.5		11.3	37	10	0.8368	0.0840
09-T2364	E2-03MOD-T	Tunel	30/06/2009	PM2.5		11.3	35	10	0.8322	0.0830
09-T2365	S2-03MOD-T	Tunel	30/06/2009	PM2.5		11.3	36	10	0.8351	0.0840
09-T2366	BLANCO1-T	Tunel	22/06/2009	PM2.5		11.3	7	10		
09-T2367	BLANCO2-T	Tunel	23/06/2009	PM2.5		11.3	17	10		
09-T2368	POLVMTY-T	Tunel	30/06/2009	PM2.5	Debris in Slide NUD-S	11.3	1193	10		
09-T2369	POLVSP-T	Tunel	30/06/2009	PM2.5	Debris in Slide	11.3	6365	10		
09-T2370	POLV1-T	Tunel	27/06/2009	PM2.5	Debris in Slide loose deposit	11.3	38618	10		
09-T2371	POLV2-T	Tunel	30/06/2009	PM2.5	Debris in Slide	11.3	15443	10		

Lab ID	Client ID	Units	Na	Na Unc.	Mg	Mg Unc.	Al	Al Unc.	Si	Si Unc.
09-T2342	E1-01ALTA-T	ug/m3	1.0880	0.6626	0.0430	0.0821	0.1178	0.0727	0.3473	0.0560
09-T2343	S1-01ALTA-T	ug/m3	1.1060	0.6512	0.1369	0.1803	0.0460	0.0676	0.3474	0.0561
09-T2344	E1-01MOD-T	ug/m3	2.4010	0.6979	0.5630	0.1884	0.1189	0.0731	0.2490	0.0468
09-T2345	S1-01MOD-T	ug/m3	1.3040	0.6636	0.2244	0.1841	0.0924	0.0717	0.3310	0.0547
09-T2346	E1-02ALTA-T	ug/m3	0.2705	0.2189	0.0297	0.0810	0.0154	0.0656	0.1711	0.0379
09-T2347	S1-02ALTA-T	ug/m3	0.8378	0.6177	0.2299	0.1732	0.0000	0.0633	0.1686	0.0396
09-T2348	E1-02MOD-T	ug/m3	0.0325	0.2146	0.0000	0.0804	0.0000	0.0631	0.1241	0.0358
09-T2349	S1-02MOD-T	ug/m3	0.8130	0.6483	0.0234	0.0813	0.0000	0.0661	0.2043	0.0428
09-T2350	E1-03ALTA-T	ug/m3	0.8977	0.6652	0.0665	0.0842	0.0000	0.0696	0.1586	0.0401
09-T2351	S1-03ALTA-T	ug/m3	1.0400	0.6868	0.0105	0.0850	0.0136	0.0714	0.1962	0.0435
09-T2352	E1-03MOD-T	ug/m3	0.2621	0.2300	0.0000	0.0857	0.0000	0.0377	0.1377	0.0383
09-T2353	S1-03MOD-T	ug/filter	0.3989	0.2430	0.0000	0.0881	0.0000	0.0384	0.0508	0.0339
09-T2354	E2-01ALTA-T	ug/m3	1.4270	0.8902	0.2431	0.2511	0.0000	0.0896	0.2581	0.0565
09-T2355	S2-01ALTA-T	ug/m3	0.4559	0.2899	0.0163	0.1058	0.0000	0.0882	0.3623	0.0641
09-T2356	E2-01MOD-T	ug/m3	0.4828	0.2878	0.0000	0.1009	0.1197	0.0882	0.2878	0.0552
09-T2357	S2-01MOD-T	ug/m3	0.2109	0.2882	0.0000	0.1061	0.0980	0.0905	0.4311	0.0710
09-T2358	E2-02ALTA-T	ug/m3	1.7130	0.8644	0.0727	0.1040	0.0364	0.0903	0.3071	0.0597
09-T2359	S2-02ALTA-T	ug/m3	1.2450	0.8174	0.0000	0.0969	0.0269	0.0849	0.2760	0.0558
09-T2360	E2-02MOD-T	ug/m3	1.3850	0.8571	0.0582	0.1057	0.0149	0.0880	0.4914	0.0770
09-T2361	S2-02MOD-T	ug/m3	1.0100	0.8447	0.0595	0.1057	0.0757	0.0923	0.5748	0.0849
09-T2362	E2-03ALTA-T	ug/m3	1.9060	0.8834	0.2839	0.2423	0.0000	0.0892	0.2514	0.0548
09-T2363	S2-03ALTA-T	ug/m3	1.0780	0.8589	0.0000	0.1067	0.0419	0.0906	0.3781	0.0671
09-T2364	E2-03MOD-T	ug/m3	1.9240	0.8926	0.2050	0.2412	0.1589	0.0964	0.4657	0.0746
09-T2365	S2-03MOD-T	ug/m3	2.8730	0.9206	0.3694	0.2330	0.1448	0.0958	0.6238	0.0923
09-T2366	BLANCO1-T	ug/filter	0.4373	0.2452	0.0000	0.0893	0.0000	0.0384	0.0000	0.0316
09-T2367	BLANCO2-T	ug/filter	0.4249	0.2430	0.0000	0.0893	0.0000	0.0734	0.0000	0.0328
09-T2368	POLVMTY-T	ug/filter	0.0000	0.9198	9.7560	1.3230	38.6600	3.0440	97.1500	6.5950
09-T2369	POLVSP-T	ug/filter	0.0000	10.2800	34.3500	8.7040	180.5000	21.7800	371.4000	35.7800
09-T2370	POLV1-T	ug/filter	12.4500	725.7000	184.4000	337.5000	496.7000	255.9000	931.1000	311.4000
09-T2371	POLV2-T	ug/filter	0.0000	104.3000	79.3800	56.8200	378.8000	82.5000	709.1000	110.1000

Highlight concentrations are less than three times the uncertainty

Lab ID	Client ID	Units	P	P Unc.	S	S Unc.	Cl	Cl Unc.	K	K Unc.
09-T2342	E1-01ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0133	0.9610	0.1161	0.0400	0.0239	0.0533	0.0134
09-T2343	S1-01ALTA-T	ug/m3	0.0317	0.0147	1.0080	0.1216	0.0644	0.0224	0.0490	0.0123
09-T2344	E1-01MOD-T	ug/m3	0.0000	0.0142	0.9623	0.1172	0.0000	0.0234	0.0701	0.0150
09-T2345	S1-01MOD-T	ug/m3	0.0365	0.0147	1.1100	0.1326	0.0000	0.0223	0.0883	0.0167
09-T2346	E1-02ALTA-T	ug/m3	0.0020	0.0133	0.3862	0.0468	0.1096	0.0260	0.0943	0.0163
09-T2347	S1-02ALTA-T	ug/m3	0.0215	0.0135	0.6314	0.0733	0.0746	0.0237	0.1032	0.0168
09-T2348	E1-02MOD-T	ug/m3	0.0153	0.0133	0.5564	0.0644	0.0417	0.0218	0.0936	0.0162
09-T2349	S1-02MOD-T	ug/m3	0.0264	0.0145	0.7601	0.0948	0.0173	0.0224	0.1026	0.0175
09-T2350	E1-03ALTA-T	ug/m3	0.0113	0.0144	0.8444	0.1048	0.0010	0.0235	0.0645	0.0148
09-T2351	S1-03ALTA-T	ug/m3	0.0336	0.0151	0.8572	0.1065	0.0724	0.0262	0.0976	0.0176
09-T2352	E1-03MOD-T	ug/m3	0.0071	0.0143	2.0050	0.2316	0.0000	0.0224	0.1142	0.0191
09-T2353	S1-03MOD-T	ug/filter	0.0136	0.0147	0.0723	0.0147	0.0000	0.0237	0.0000	0.0124
09-T2354	E2-01ALTA-T	ug/m3	0.0217	0.0191	2.2020	0.2554	0.0000	0.0285	0.0733	0.0179
09-T2355	S2-01ALTA-T	ug/m3	0.0027	0.0190	2.0790	0.2419	0.0190	0.0286	0.0502	0.0157
09-T2356	E2-01MOD-T	ug/m3	0.0175	0.0176	0.4411	0.0531	0.0403	0.0272	0.0350	0.0152
09-T2357	S2-01MOD-T	ug/m3	0.0295	0.0190	0.5466	0.0648	0.0000	0.0282	0.0725	0.0177
09-T2358	E2-02ALTA-T	ug/m3	0.0189	0.0190	1.8100	0.2129	0.0000	0.0269	0.0700	0.0176
09-T2359	S2-02ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0162	1.7500	0.2056	0.0000	0.0256	0.0714	0.0177
09-T2360	E2-02MOD-T	ug/m3	0.0068	0.0176	1.8030	0.2108	0.0190	0.0285	0.1678	0.0253
09-T2361	S2-02MOD-T	ug/m3	0.0176	0.0177	1.7080	0.2023	0.0000	0.0284	0.1866	0.0276
09-T2362	E2-03ALTA-T	ug/m3	0.0027	0.0189	1.3770	0.1782	0.0230	0.0298	0.0703	0.0177
09-T2363	S2-03ALTA-T	ug/m3	0.0311	0.0192	1.4060	0.1691	0.0000	0.0284	0.0702	0.0177
09-T2364	E2-03MOD-T	ug/m3	0.0000	0.0190	2.5540	0.2946	0.0000	0.0299	0.1602	0.0259
09-T2365	S2-03MOD-T	ug/m3	0.0000	0.0189	2.5510	0.2953	0.0352	0.0286	0.2287	0.0316
09-T2366	BLANCO1-T	ug/filter	0.0113	0.0147	0.0000	0.0124	0.0000	0.0249	0.0000	0.0124
09-T2367	BLANCO2-T	ug/filter	0.0170	0.0147	0.0000	0.0147	0.0102	0.0237	0.0000	0.0124
09-T2368	POLVMTY-T	ug/filter	1.2360	0.0938	1.7630	0.1085	0.2667	0.0757	15.4600	0.7978
09-T2369	POLVSP-T	ug/filter	5.1090	0.4723	18.6600	1.5760	1.3830	0.2656	63.3700	3.4260
09-T2370	POLV1-T	ug/filter	21.0300	6.7070	535.3000	74.3700	27.7100	3.9450	226.9000	23.0100
09-T2371	POLV2-T	ug/filter	10.4300	1.6520	85.4200	8.6750	8.5320	1.3190	139.8000	11.9000

Lab ID	Client ID	Units	Ca	Ca Unc.	Ti	Ti Unc.	V	V Unc.	Cr	Cr Unc.
09-T2342	E1-01ALTA-T	ug/m3	0.2448	0.0300	0.0143	0.0053	0.0000	0.0051	0.0000	0.0061
09-T2343	S1-01ALTA-T	ug/m3	0.3872	0.0454	0.0174	0.0054	0.0031	0.0041	0.0000	0.0051
09-T2344	E1-01MOD-T	ug/m3	0.2795	0.0334	0.0193	0.0054	0.0112	0.0052	0.0000	0.0061
09-T2345	S1-01MOD-T	ug/m3	0.4122	0.0478	0.0264	0.0066	0.0071	0.0051	0.0000	0.0061
09-T2346	E1-02ALTA-T	ug/m3	0.1485	0.0193	0.0133	0.0053	0.0000	0.0051	0.0000	0.0051
09-T2347	S1-02ALTA-T	ug/m3	0.4240	0.0496	0.0163	0.0054	0.0000	0.0041	0.0000	0.0051
09-T2348	E1-02MOD-T	ug/m3	0.2777	0.0332	0.0163	0.0053	0.0000	0.0041	0.0000	0.0051
09-T2349	S1-02MOD-T	ug/m3	0.4268	0.0496	0.0173	0.0054	0.0000	0.0051	0.0000	0.0051
09-T2350	E1-03ALTA-T	ug/m3	0.7062	0.0804	0.0133	0.0053	0.0000	0.0051	0.0000	0.0061
09-T2351	S1-03ALTA-T	ug/m3	0.8173	0.0931	0.0147	0.0054	0.0021	0.0053	0.0063	0.0063
09-T2352	E1-03MOD-T	ug/m3	0.4202	0.0492	0.0173	0.0054	0.0000	0.0051	0.0000	0.0061
09-T2353	S1-03MOD-T	<b>ug/filter</b>	0.1446	0.0136	0.0000	0.0056	0.0000	0.0056	0.0000	0.0068
09-T2354	E2-01ALTA-T	ug/m3	0.5419	0.0631	0.0190	0.0071	0.0272	0.0073	0.0027	0.0082
09-T2355	S2-01ALTA-T	ug/m3	0.8195	0.0938	0.0529	0.0097	0.0271	0.0073	0.0081	0.0068
09-T2356	E2-01MOD-T	ug/m3	0.6011	0.0695	0.0336	0.0075	0.0027	0.0067	0.0000	0.0067
09-T2357	S2-01MOD-T	ug/m3	1.1190	0.1270	0.0618	0.0101	0.0054	0.0067	0.0161	0.0082
09-T2358	E2-02ALTA-T	ug/m3	0.4593	0.0540	0.0135	0.0069	0.0108	0.0068	0.0121	0.0082
09-T2359	S2-02ALTA-T	ug/m3	0.7957	0.0912	0.0417	0.0079	0.0162	0.0069	0.0067	0.0068
09-T2360	E2-02MOD-T	ug/m3	1.2330	0.1394	0.0244	0.0072	0.0014	0.0068	0.0000	0.0068
09-T2361	S2-02MOD-T	ug/m3	1.3980	0.1591	0.0338	0.0076	0.0054	0.0068	0.0000	0.0068
09-T2362	E2-03ALTA-T	ug/m3	0.6137	0.0717	0.0311	0.0074	0.0000	0.0068	0.0000	0.0081
09-T2363	S2-03ALTA-T	ug/m3	0.9129	0.1044	0.0324	0.0075	0.0081	0.0068	0.0014	0.0081
09-T2364	E2-03MOD-T	ug/m3	0.6192	0.0718	0.0394	0.0090	0.0000	0.0068	0.0068	0.0082
09-T2365	S2-03MOD-T	ug/m3	1.0780	0.1231	0.0677	0.0106	0.0081	0.0068	0.0000	0.0068
09-T2366	BLANCO1-T	<b>ug/filter</b>	0.0000	0.0090	0.0000	0.0056	0.0068	0.0056	0.0056	0.0068
09-T2367	BLANCO2-T	<b>ug/filter</b>	0.0576	0.0249	0.0000	0.0056	0.0045	0.0056	0.0000	0.0068
09-T2368	POLVMTY-T	<b>ug/filter</b>	138.0000	6.9920	1.9380	0.1051	0.1028	0.0203	0.0814	0.0158
09-T2369	POLVSP-T	<b>ug/filter</b>	840.5000	44.5100	9.8210	0.5028	0.5865	0.0667	0.6678	0.0542
09-T2370	POLV1-T	<b>ug/filter</b>	4874.0000	314.7000	27.3800	1.4310	1.6060	0.2576	4.8950	0.3153
09-T2371	POLV2-T	<b>ug/filter</b>	2057.0000	116.4000	21.1000	1.1060	1.3100	0.1842	1.9500	0.1571

Lab ID	Client ID	Units	Mn	Mn Unc.	Fe	Fe Unc.	Co	Co Unc.	Ni	Ni Unc.
09-T2342	E1-01ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0092	0.3268	0.0391	0.0051	0.0205	0.0000	0.0174
09-T2343	S1-01ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0082	0.6375	0.0733	0.0000	0.0184	0.0153	0.0164
09-T2344	E1-01MOD-T	ug/m3	0.0000	0.0091	0.3719	0.0444	0.0000	0.0183	0.0305	0.0185
09-T2345	S1-01MOD-T	ug/m3	0.0173	0.0083	0.6660	0.0763	0.0000	0.0193	0.0071	0.0173
09-T2346	E1-02ALTA-T	ug/m3	0.0031	0.0082	0.2151	0.0276	0.0000	0.0174	0.0195	0.0175
09-T2347	S1-02ALTA-T	ug/m3	0.0174	0.0084	0.4843	0.0728	0.0000	0.0174	0.1635	0.0270
09-T2348	E1-02MOD-T	ug/m3	0.0000	0.0081	0.3387	0.0400	0.0000	0.0183	0.0244	0.0165
09-T2349	S1-02MOD-T	ug/m3	0.0102	0.0082	0.6056	0.0696	0.0000	0.0193	0.0366	0.0187
09-T2350	E1-03ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0092	0.2886	0.0353	0.0000	0.0184	0.0000	0.0184
09-T2351	S1-03ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0084	0.3777	0.0449	0.0000	0.0178	0.0000	0.0178
09-T2352	E1-03MOD-T	ug/m3	0.0000	0.0092	0.5303	0.0788	0.0000	0.0173	0.0255	0.0185
09-T2353	S1-03MOD-T	ug/filter	0.0000	0.0090	0.0486	0.0136	0.0000	0.0203	0.0452	0.0203
09-T2354	E2-01ALTA-T	ug/m3	0.0272	0.0112	0.7225	0.0835	0.0000	0.0258	0.0136	0.0231
09-T2355	S2-01ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0109	1.1610	0.1315	0.0638	0.0266	0.0312	0.0219
09-T2356	E2-01MOD-T	ug/m3	0.0013	0.0108	0.7638	0.0876	0.0000	0.0229	0.0000	0.0215
09-T2357	S2-01MOD-T	ug/m3	0.0000	0.0107	1.6480	0.1856	0.0228	0.0270	0.0295	0.0230
09-T2358	E2-02ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0108	0.6276	0.0733	0.0000	0.0242	0.0067	0.0229
09-T2359	S2-02ALTA-T	ug/m3	0.0054	0.0108	1.1390	0.1523	0.0000	0.0242	0.0431	0.0220
09-T2360	E2-02MOD-T	ug/m3	0.0027	0.0108	0.6389	0.0740	0.0000	0.0244	0.0095	0.0217
09-T2361	S2-02MOD-T	ug/m3	0.0041	0.0108	0.9846	0.1128	0.0000	0.0257	0.0162	0.0230
09-T2362	E2-03ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0122	0.7502	0.0869	0.0000	0.0230	0.0324	0.0232
09-T2363	S2-03ALTA-T	ug/m3	0.0027	0.0108	1.2560	0.1430	0.0135	0.0257	0.0081	0.0230
09-T2364	E2-03MOD-T	ug/m3	0.0258	0.0125	0.7903	0.0907	0.0000	0.0231	0.0367	0.0247
09-T2365	S2-03MOD-T	ug/m3	0.0149	0.0109	1.5110	0.1717	0.0000	0.0257	0.0000	0.0230
09-T2366	BLANCO1-T	ug/filter	0.0045	0.0090	0.0000	0.0124	0.0000	0.0203	0.0396	0.0203
09-T2367	BLANCO2-T	ug/filter	0.0090	0.0090	0.0000	0.0124	0.0000	0.0192	0.0339	0.0203
09-T2368	POLVMTY-T	ug/filter	0.4147	0.0294	21.9700	1.1020	0.0294	0.0316	0.0000	0.0215
09-T2369	POLVSP-T	ug/filter	1.8750	0.1062	111.5000	5.5810	0.2316	0.0734	0.0542	0.0328
09-T2370	POLV1-T	ug/filter	7.1550	0.4170	432.5000	30.6600	3.0490	0.2181	1.3000	0.0983
09-T2371	POLV2-T	ug/filter	3.8590	0.2441	263.1000	13.1800	1.1320	0.1119	0.4283	0.0475

Lab ID	Client ID	Units	Cu	Cu Unc.	Zn	Zn Unc.	Ga	Ga Unc.	Ge	Ge Unc.
09-T2342	E1-01ALTA-T	ug/m3	0.0471	0.0171	0.0092	0.0215	0.0154	0.0124	0.0000	0.0143
09-T2343	S1-01ALTA-T	ug/m3	0.0674	0.0168	0.0470	0.0220	0.0133	0.0113	0.0245	0.0115
09-T2344	E1-01MOD-T	ug/m3	0.0884	0.0203	0.0539	0.0230	0.0274	0.0135	0.0244	0.0124
09-T2345	S1-01MOD-T	ug/m3	0.0701	0.0186	0.0579	0.0231	0.0000	0.0112	0.0132	0.0112
09-T2346	E1-02ALTA-T	ug/m3	0.0666	0.0177	0.0000	0.0205	0.0000	0.0113	0.0215	0.0125
09-T2347	S1-02ALTA-T	ug/m3	0.1114	0.0207	0.4587	0.2877	0.0020	0.0112	0.0000	0.0133
09-T2348	E1-02MOD-T	ug/m3	0.0773	0.0180	0.0071	0.0204	0.0000	0.0112	0.0000	0.0132
09-T2349	S1-02MOD-T	ug/m3	0.0874	0.0194	0.0274	0.0215	0.0071	0.0122	0.0000	0.0142
09-T2350	E1-03ALTA-T	ug/m3	0.0747	0.0199	0.0532	0.0231	0.0061	0.0123	0.0000	0.0154
09-T2351	S1-03ALTA-T	ug/m3	0.0724	0.0193	0.0493	0.0236	0.0052	0.0126	0.0000	0.0147
09-T2352	E1-03MOD-T	ug/m3	0.1020	0.0210	0.0724	0.0246	0.0000	0.0122	0.0194	0.0124
09-T2353	S1-03MOD-T	<b>ug/filter</b>	0.0825	0.0192	0.0158	0.0237	0.0090	0.0136	0.0282	0.0136
09-T2354	E2-01ALTA-T	ug/m3	0.1290	0.0264	0.0516	0.0290	0.0190	0.0164	0.0353	0.0167
09-T2355	S2-01ALTA-T	ug/m3	0.1506	0.0275	0.0651	0.0292	0.0136	0.0150	0.0217	0.0151
09-T2356	E2-01MOD-T	ug/m3	0.0982	0.0236	0.0363	0.0271	0.0040	0.0148	0.0148	0.0149
09-T2357	S2-01MOD-T	ug/m3	0.0913	0.0233	0.0577	0.0288	0.0228	0.0149	0.0295	0.0151
09-T2358	E2-02ALTA-T	ug/m3	0.0754	0.0228	0.0646	0.0303	0.0081	0.0162	0.0162	0.0162
09-T2359	S2-02ALTA-T	ug/m3	0.1198	0.0247	0.0633	0.0290	0.0000	0.0148	0.0000	0.0148
09-T2360	E2-02MOD-T	ug/m3	0.1083	0.0242	0.1002	0.0314	0.0000	0.0149	0.0000	0.0176
09-T2361	S2-02MOD-T	ug/m3	0.1028	0.0252	0.0784	0.0308	0.0095	0.0149	0.0000	0.0189
09-T2362	E2-03ALTA-T	ug/m3	0.1135	0.0257	0.0203	0.0271	0.0054	0.0149	0.0095	0.0149
09-T2363	S2-03ALTA-T	ug/m3	0.1107	0.0255	0.0581	0.0290	0.0027	0.0149	0.0000	0.0189
09-T2364	E2-03MOD-T	ug/m3	0.0883	0.0247	0.0910	0.0312	0.0149	0.0164	0.0000	0.0190
09-T2365	S2-03MOD-T	ug/m3	0.1448	0.0272	0.0961	0.0313	0.0000	0.0149	0.0203	0.0150
09-T2366	BLANCO1-T	<b>ug/filter</b>	0.0859	0.0192	0.0226	0.0237	0.0000	0.0136	0.0090	0.0136
09-T2367	BLANCO2-T	<b>ug/filter</b>	0.0893	0.0192	0.0000	0.0226	0.0000	0.0136	0.0000	0.0158
09-T2368	POLVMTY-T	<b>ug/filter</b>	0.1209	0.0215	0.3978	0.0384	0.0170	0.0147	0.0181	0.0147
09-T2369	POLVSP-T	<b>ug/filter</b>	0.6339	0.0497	4.2250	0.2294	0.0452	0.0226	0.0429	0.0203
09-T2370	POLV1-T	<b>ug/filter</b>	4.8850	0.2610	31.8500	1.6100	0.0215	0.0475	0.0000	0.0576
09-T2371	POLV2-T	<b>ug/filter</b>	2.2090	0.1232	10.0500	0.5187	0.0554	0.0271	0.0000	0.0316



Lab ID	Client ID	Units	As	As Unc.	Se	Se Unc.	Br	Br Unc.	Rb	Rb Unc.
09-T2342	E1-01ALTA-T	ug/m3	0.0318	0.0117	0.0072	0.0123	0.0041	0.0092	0.0031	0.0123
09-T2343	S1-01ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0153	0.0225	0.0115	0.0133	0.0093	0.0163	0.0114
09-T2344	E1-01MOD-T	ug/m3	0.0274	0.0125	0.0152	0.0133	0.0122	0.0102	0.0000	0.0122
09-T2345	S1-01MOD-T	ug/m3	0.0000	0.0162	0.0173	0.0123	0.0152	0.0093	0.0152	0.0123
09-T2346	E1-02ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0154	0.0000	0.0123	0.0389	0.0100	0.0000	0.0123
09-T2347	S1-02ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0153	0.0031	0.0112	0.0286	0.0096	0.0225	0.0115
09-T2348	E1-02MOD-T	ug/m3	0.0264	0.0105	0.0031	0.0112	0.0183	0.0093	0.0000	0.0112
09-T2349	S1-02MOD-T	ug/m3	0.0264	0.0115	0.0000	0.0122	0.0000	0.0091	0.0366	0.0127
09-T2350	E1-03ALTA-T	ug/m3	0.0041	0.0174	0.0409	0.0139	0.0174	0.0104	0.0000	0.0123
09-T2351	S1-03ALTA-T	ug/m3	0.0357	0.0121	0.0168	0.0127	0.0031	0.0105	0.0336	0.0130
09-T2352	E1-03MOD-T	ug/m3	0.0449	0.0130	0.0224	0.0134	0.0173	0.0103	0.0214	0.0124
09-T2353	S1-03MOD-T	ug/filter	0.0000	0.0192	0.0056	0.0136	0.0226	0.0102	0.0000	0.0136
09-T2354	E2-01ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0217	0.0122	0.0163	0.0244	0.0125	0.0244	0.0165
09-T2355	S2-01ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0204	0.0176	0.0150	0.0054	0.0122	0.0041	0.0149
09-T2356	E2-01MOD-T	ug/m3	0.0202	0.0136	0.0040	0.0148	0.0013	0.0121	0.0215	0.0149
09-T2357	S2-01MOD-T	ug/m3	0.0497	0.0156	0.0255	0.0163	0.0148	0.0122	0.0269	0.0163
09-T2358	E2-02ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0215	0.0000	0.0162	0.0189	0.0123	0.0054	0.0162
09-T2359	S2-02ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0202	0.0108	0.0148	0.0135	0.0109	0.0175	0.0149
09-T2360	E2-02MOD-T	ug/m3	0.0000	0.0203	0.0054	0.0149	0.0054	0.0108	0.0041	0.0149
09-T2361	S2-02MOD-T	ug/m3	0.0555	0.0159	0.0176	0.0163	0.0162	0.0123	0.0176	0.0150
09-T2362	E2-03ALTA-T	ug/m3	0.0460	0.0156	0.0284	0.0165	0.0000	0.0122	0.0176	0.0163
09-T2363	S2-03ALTA-T	ug/m3	0.0270	0.0151	0.0000	0.0162	0.0014	0.0122	0.0284	0.0165
09-T2364	E2-03MOD-T	ug/m3	0.0000	0.0231	0.0027	0.0163	0.0190	0.0124	0.0177	0.0164
09-T2365	S2-03MOD-T	ug/m3	0.0000	0.0203	0.0000	0.0162	0.0189	0.0123	0.0189	0.0150
09-T2366	BLANCO1-T	ug/filter	0.0000	0.0192	0.0045	0.0136	0.0079	0.0102	0.0011	0.0136
09-T2367	BLANCO2-T	ug/filter	0.0000	0.0181	0.0000	0.0136	0.0203	0.0102	0.0000	0.0136
09-T2368	POLVMTY-T	ug/filter	0.0203	0.0215	0.0147	0.0147	0.0282	0.0113	0.0927	0.0158
09-T2369	POLVSP-T	ug/filter	0.0814	0.0441	0.0000	0.0192	0.0350	0.0158	0.3808	0.0305
09-T2370	POLV1-T	ug/filter	0.3413	0.1322	0.0542	0.0362	0.2486	0.0350	1.1790	0.0712
09-T2371	POLV2-T	ug/filter	0.2192	0.0610	0.0158	0.0226	0.0576	0.0192	0.7605	0.0463

Lab ID	Client ID	Units	Sr	Sr Unc.	Y	Y Unc.	Zr	Zr Unc.	Mo	Mo Unc.
09-T2342	E1-01ALTA-T	ug/m3	0.0287	0.0146	0.0236	0.0166	0.0205	0.0186	0.0461	0.0280
09-T2343	S1-01ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0123	0.0061	0.0143	0.0255	0.0176	0.0174	0.0246
09-T2344	E1-01MOD-T	ug/m3	0.0061	0.0142	0.0193	0.0174	0.0396	0.0207	0.0508	0.0289
09-T2345	S1-01MOD-T	ug/m3	0.0122	0.0133	0.0162	0.0163	0.0497	0.0189	0.0071	0.0264
09-T2346	E1-02ALTA-T	ug/m3	0.0092	0.0133	0.0645	0.0167	0.0512	0.0191	0.0738	0.0276
09-T2347	S1-02ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0133	0.0061	0.0153	0.0072	0.0174	0.0000	0.0245
09-T2348	E1-02MOD-T	ug/m3	0.0102	0.0133	0.0376	0.0157	0.0132	0.0173	0.0000	0.0254
09-T2349	S1-02MOD-T	ug/m3	0.0295	0.0145	0.0020	0.0163	0.0285	0.0185	0.0305	0.0266
09-T2350	E1-03ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0143	0.0287	0.0166	0.0225	0.0196	0.0123	0.0287
09-T2351	S1-03ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0147	0.0021	0.0168	0.0304	0.0202	0.0902	0.0297
09-T2352	E1-03MOD-T	ug/m3	0.0214	0.0144	0.0000	0.0163	0.0459	0.0199	0.0296	0.0277
09-T2353	S1-03MOD-T	ug/filter	0.0147	0.0158	0.0429	0.0181	0.0294	0.0215	0.0079	0.0305
09-T2354	E2-01ALTA-T	ug/m3	0.0340	0.0193	0.0054	0.0217	0.0489	0.0263	0.0136	0.0367
09-T2355	S2-01ALTA-T	ug/m3	0.0014	0.0176	0.0326	0.0206	0.0163	0.0231	0.0000	0.0339
09-T2356	E2-01MOD-T	ug/m3	0.0161	0.0176	0.0282	0.0204	0.0565	0.0235	0.0363	0.0338
09-T2357	S2-01MOD-T	ug/m3	0.0269	0.0177	0.0121	0.0202	0.0363	0.0244	0.0000	0.0349
09-T2358	E2-02ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0175	0.0081	0.0216	0.0296	0.0244	0.0646	0.0369
09-T2359	S2-02ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0162	0.0000	0.0188	0.0471	0.0221	0.0000	0.0323
09-T2360	E2-02MOD-T	ug/m3	0.0271	0.0178	0.0000	0.0203	0.0406	0.0234	0.0108	0.0339
09-T2361	S2-02MOD-T	ug/m3	0.0108	0.0176	0.0379	0.0206	0.0446	0.0234	0.0162	0.0339
09-T2362	E2-03ALTA-T	ug/m3	0.0095	0.0176	0.0230	0.0204	0.0608	0.0251	0.0243	0.0352
09-T2363	S2-03ALTA-T	ug/m3	0.0014	0.0176	0.0243	0.0204	0.0567	0.0250	0.0000	0.0351
09-T2364	E2-03MOD-T	ug/m3	0.0027	0.0190	0.0149	0.0218	0.0842	0.0258	0.0081	0.0367
09-T2365	S2-03MOD-T	ug/m3	0.0257	0.0178	0.0244	0.0204	0.0433	0.0234	0.0257	0.0339
09-T2366	BLANCO1-T	ug/filter	0.0056	0.0158	0.0045	0.0181	0.0610	0.0215	0.0396	0.0305
09-T2367	BLANCO2-T	ug/filter	0.0000	0.0158	0.0147	0.0181	0.0486	0.0215	0.0814	0.0305
09-T2368	POLVMTY-T	ug/filter	0.4238	0.0294	0.0090	0.0192	0.1130	0.0237	0.0000	0.0316
09-T2369	POLVSP-T	ug/filter	1.5870	0.0870	0.0825	0.0271	0.6712	0.0486	0.0000	0.0429
09-T2370	POLV1-T	ug/filter	11.0900	0.5605	0.0328	0.0429	5.3820	0.2780	0.5650	0.0712
09-T2371	POLV2-T	ug/filter	4.0570	0.2079	0.1198	0.0294	1.8740	0.1017	0.0000	0.0441

Lab ID	Client ID	Units	Pd	Pd Unc.	Ag	Ag Unc.	Cd	Cd Unc.	In	In Unc.
09-T2342	E1-01ALTA-T	ug/m3	0.0348	0.0452	0.0113	0.0420	0.0061	0.0400	0.0000	0.0420
09-T2343	S1-01ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0409	0.0061	0.0399	0.0000	0.0378	0.0000	0.0398
09-T2344	E1-01MOD-T	ug/m3	0.0000	0.0447	0.0000	0.0417	0.0000	0.0406	0.0000	0.0427
09-T2345	S1-01MOD-T	ug/m3	0.0000	0.0447	0.0000	0.0416	0.0203	0.0407	0.0000	0.0406
09-T2346	E1-02ALTA-T	ug/m3	0.0236	0.0431	0.0574	0.0414	0.0430	0.0392	0.0000	0.0410
09-T2347	S1-02ALTA-T	ug/m3	0.0153	0.0429	0.0776	0.0416	0.0347	0.0390	0.0000	0.0388
09-T2348	E1-02MOD-T	ug/m3	0.0071	0.0427	0.0539	0.0410	0.0346	0.0378	0.0000	0.0397
09-T2349	S1-02MOD-T	ug/m3	0.0803	0.0454	0.0315	0.0408	0.0325	0.0408	0.0244	0.0417
09-T2350	E1-03ALTA-T	ug/m3	0.0317	0.0462	0.0358	0.0431	0.0358	0.0421	0.0000	0.0430
09-T2351	S1-03ALTA-T	ug/m3	0.0063	0.0451	0.0000	0.0420	0.0010	0.0409	0.0000	0.0441
09-T2352	E1-03MOD-T	ug/m3	0.0000	0.0449	0.1061	0.0451	0.0265	0.0419	0.0224	0.0429
09-T2353	S1-03MOD-T	<b>ug/filter</b>	0.0452	0.0497	0.0734	0.0452	0.0000	0.0452	0.0689	0.0475
09-T2354	E2-01ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0598	0.0421	0.0558	0.0000	0.0530	0.0000	0.0557
09-T2355	S2-01ALTA-T	ug/m3	0.0353	0.0571	0.0488	0.0545	0.1045	0.0553	0.0000	0.0543
09-T2356	E2-01MOD-T	ug/m3	0.0108	0.0551	0.0148	0.0525	0.0148	0.0498	0.0000	0.0538
09-T2357	S2-01MOD-T	ug/m3	0.0040	0.0578	0.0389	0.0539	0.0430	0.0526	0.0027	0.0551
09-T2358	E2-02ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0593	0.0404	0.0554	0.0283	0.0539	0.0000	0.0539
09-T2359	S2-02ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0539	0.0094	0.0525	0.0821	0.0518	0.0000	0.0525
09-T2360	E2-02MOD-T	ug/m3	0.0000	0.0541	0.0271	0.0515	0.0000	0.0501	0.0000	0.0528
09-T2361	S2-02MOD-T	ug/m3	0.0000	0.0568	0.0000	0.0541	0.0487	0.0530	0.0000	0.0555
09-T2362	E2-03ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0581	0.0000	0.0554	0.0338	0.0528	0.0243	0.0555
09-T2363	S2-03ALTA-T	ug/m3	0.0243	0.0595	0.0297	0.0554	0.0392	0.0542	0.0122	0.0554
09-T2364	E2-03MOD-T	ug/m3	0.0801	0.0616	0.1371	0.0586	0.0421	0.0531	0.0000	0.0570
09-T2365	S2-03MOD-T	ug/m3	0.0000	0.0568	0.0000	0.0528	0.0000	0.0501	0.0000	0.0541
09-T2366	BLANCO1-T	<b>ug/filter</b>	0.0203	0.0508	0.0000	0.0452	0.0746	0.0463	0.0000	0.0475
09-T2367	BLANCO2-T	<b>ug/filter</b>	0.0000	0.0486	0.0881	0.0475	0.0441	0.0441	0.0271	0.0475
09-T2368	POLVMTY-T	<b>ug/filter</b>	0.0011	0.0565	0.0836	0.0508	0.1175	0.0497	0.0000	0.0508
09-T2369	POLVSP-T	<b>ug/filter</b>	0.0610	0.0723	0.1277	0.0678	0.0463	0.0633	0.0000	0.0644
09-T2370	POLV1-T	<b>ug/filter</b>	0.0305	0.1220	0.1819	0.1119	0.2610	0.1085	0.0000	0.1062
09-T2371	POLV2-T	<b>ug/filter</b>	0.0949	0.0881	0.1571	0.0825	0.1706	0.0791	0.0520	0.0780

Lab ID	Client ID	Units	Sn	Sn Unc.	Sb	Sb Unc.	Ba	Ba Unc.	La	La Unc.
09-T2342	E1-01ALTA-T	ug/m3	0.0307	0.0513	0.0369	0.0606	0.0000	0.0195	0.0031	0.0123
09-T2343	S1-01ALTA-T	ug/m3	0.0215	0.0491	0.0603	0.0555	0.0000	0.0174	0.0000	0.0112
09-T2344	E1-01MOD-T	ug/m3	0.0965	0.0547	0.0325	0.0631	0.0000	0.0193	0.0000	0.0122
09-T2345	S1-01MOD-T	ug/m3	0.0315	0.0519	0.0193	0.0609	0.0081	0.0193	0.0000	0.0122
09-T2346	E1-02ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0492	0.0359	0.0575	0.0000	0.0184	0.0000	0.0113
09-T2347	S1-02ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0490	0.0112	0.0562	0.0204	0.0175	0.0000	0.0112
09-T2348	E1-02MOD-T	ug/m3	0.0112	0.0499	0.0478	0.0561	0.0000	0.0173	0.0081	0.0112
09-T2349	S1-02MOD-T	ug/m3	0.0132	0.0508	0.0945	0.0607	0.0122	0.0193	0.0000	0.0122
09-T2350	E1-03ALTA-T	ug/m3	0.0860	0.0559	0.1095	0.0654	0.0000	0.0194	0.0010	0.0123
09-T2351	S1-03ALTA-T	ug/m3	0.0094	0.0535	0.0472	0.0621	0.0115	0.0200	0.0000	0.0126
09-T2352	E1-03MOD-T	ug/m3	0.0918	0.0558	0.0000	0.0622	0.0000	0.0194	0.0000	0.0122
09-T2353	S1-03MOD-T	<b>ug/filter</b>	0.0350	0.0576	0.0508	0.0667	0.0000	0.0203	0.0079	0.0124
09-T2354	E2-01ALTA-T	ug/m3	0.0177	0.0693	0.0000	0.0788	0.0000	0.0258	0.0000	0.0163
09-T2355	S2-01ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0678	0.0529	0.0775	0.0407	0.0261	0.0163	0.0164
09-T2356	E2-01MOD-T	ug/m3	0.0067	0.0659	0.0108	0.0767	0.0161	0.0243	0.0000	0.0148
09-T2357	S2-01MOD-T	ug/m3	0.0766	0.0689	0.1692	0.0823	0.0537	0.0274	0.0000	0.0161
09-T2358	E2-02ALTA-T	ug/m3	0.0189	0.0674	0.1535	0.0809	0.0000	0.0242	0.0000	0.0148
09-T2359	S2-02ALTA-T	ug/m3	0.0054	0.0646	0.2087	0.0782	0.0323	0.0244	0.0000	0.0148
09-T2360	E2-02MOD-T	ug/m3	0.0569	0.0666	0.0000	0.0758	0.0054	0.0244	0.0000	0.0149
09-T2361	S2-02MOD-T	ug/m3	0.0000	0.0663	0.0446	0.0786	0.0054	0.0257	0.0000	0.0162
09-T2362	E2-03ALTA-T	ug/m3	0.1608	0.0721	0.1230	0.0820	0.0122	0.0271	0.0000	0.0162
09-T2363	S2-03ALTA-T	ug/m3	0.2026	0.0757	0.0540	0.0772	0.0351	0.0272	0.0000	0.0162
09-T2364	E2-03MOD-T	ug/m3	0.1073	0.0714	0.0964	0.0834	0.0136	0.0272	0.0000	0.0163
09-T2365	S2-03MOD-T	ug/m3	0.0392	0.0678	0.1326	0.0783	0.0338	0.0259	0.0000	0.0162
09-T2366	BLANCO1-T	<b>ug/filter</b>	0.0000	0.0588	0.0000	0.0667	0.0000	0.0215	0.0136	0.0124
09-T2367	BLANCO2-T	<b>ug/filter</b>	0.1853	0.0610	0.2226	0.0689	0.0000	0.0203	0.0000	0.0124
09-T2368	POLVMTY-T	<b>ug/filter</b>	0.0305	0.0633	0.0000	0.0734	0.2316	0.0814	0.0000	0.0859
09-T2369	POLVSP-T	<b>ug/filter</b>	0.2475	0.0780	0.3582	0.0893	1.8110	0.3288	0.0000	0.3164
09-T2370	POLV1-T	<b>ug/filter</b>	1.0950	0.1435	1.0260	0.1582	8.2280	1.2180	0.0000	1.1620
09-T2371	POLV2-T	<b>ug/filter</b>	0.2735	0.0938	0.4667	0.1096	6.4000	0.8791	0.0000	0.8080

Lab ID	Client ID	Units	Hg	Hg Unc.	Pb	Pb Unc.
09-T2342	E1-01ALTA-T	ug/m3	0.0697	0.0265	0.0000	0.0256
09-T2343	S1-01ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0266	0.0613	0.0243
09-T2344	E1-01MOD-T	ug/m3	0.0000	0.0305	0.0325	0.0266
09-T2345	S1-01MOD-T	ug/m3	0.0000	0.0284	0.0457	0.0258
09-T2346	E1-02ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0287	0.0389	0.0249
09-T2347	S1-02ALTA-T	ug/m3	0.0542	0.0251	0.0276	0.0237
09-T2348	E1-02MOD-T	ug/m3	0.0376	0.0237	0.0000	0.0234
09-T2349	S1-02MOD-T	ug/m3	0.0467	0.0258	0.0061	0.0244
09-T2350	E1-03ALTA-T	ug/m3	0.0676	0.0275	0.0430	0.0270
09-T2351	S1-03ALTA-T	ug/m3	0.0388	0.0265	0.0315	0.0264
09-T2352	E1-03MOD-T	ug/m3	0.0000	0.0306	0.0173	0.0266
09-T2353	S1-03MOD-T	<b>ug/filter</b>	0.0000	0.0328	0.0090	0.0294
09-T2354	E2-01ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0394	0.0611	0.0345
09-T2355	S2-01ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0366	0.0421	0.0328
09-T2356	E2-01MOD-T	ug/m3	0.0000	0.0363	0.0202	0.0310
09-T2357	S2-01MOD-T	ug/m3	0.0000	0.0376	0.0309	0.0324
09-T2358	E2-02ALTA-T	ug/m3	0.0283	0.0324	0.0498	0.0340
09-T2359	S2-02ALTA-T	ug/m3	0.0000	0.0310	0.0323	0.0298
09-T2360	E2-02MOD-T	ug/m3	0.0420	0.0314	0.0623	0.0331
09-T2361	S2-02MOD-T	ug/m3	0.0541	0.0329	0.0108	0.0325
09-T2362	E2-03ALTA-T	ug/m3	0.0230	0.0325	0.0000	0.0324
09-T2363	S2-03ALTA-T	ug/m3	0.0500	0.0328	0.0324	0.0326
09-T2364	E2-03MOD-T	ug/m3	0.0964	0.0353	0.0584	0.0344
09-T2365	S2-03MOD-T	ug/m3	0.0000	0.0365	0.0690	0.0332
09-T2366	BLANCO1-T	<b>ug/filter</b>	0.0136	0.0282	0.0452	0.0282
09-T2367	BLANCO2-T	<b>ug/filter</b>	0.0712	0.0282	0.0429	0.0282
09-T2368	POLVMTY-T	<b>ug/filter</b>	0.0000	0.0350	0.1254	0.0316
09-T2369	POLVSP-T	<b>ug/filter</b>	0.0000	0.0486	1.5840	0.0994
09-T2370	POLV1-T	<b>ug/filter</b>	2.0750	0.1367	20.9000	1.0600
09-T2371	POLV2-T	<b>ug/filter</b>	0.6034	0.0599	4.8940	0.2588

## Filtros de Cuarzo

Lab ID	Client ID	Site	Sample Date	Part. Size	Comments	Deposit Area	Volume	Volume Unc.
09-U457	E1-01ALTA-C	Tunel	22/06/2009	PM2.5		12	1.103	0.11
09-U458	S1-01ALTA-C	Tunel	22/06/2009	PM2.5		12	1.106	0.111
09-U459	E1-01MOD-C	Tunel	22/06/2009	PM2.5		12	1.112	0.111
09-U460	S1-01MOD-C	Tunel	22/06/2009	PM2.5		12	1.113	0.111
09-U461	E1-02ALTA-C	Tunel	23/06/2009	PM2.5		12	1.103	0.11
09-U462	S1-02ALTA-C	Tunel	23/06/2009	PM2.5		12	1.106	0.111
09-U463	E1-02MOD-C	Tunel	23/06/2009	PM2.5		12	1.111	0.111
09-U464	S1-02MOD-C	Tunel	23/06/2009	PM2.5		12	1.112	0.111
09-U465	E1-03ALTA-C	Tunel	24/06/2009	PM2.5		12	1.104	0.11
09-U466	S1-03ALTA-C	Tunel	24/06/2009	PM2.5		12	1.106	0.111
09-U467	E1-03MOD-C	Tunel	24/06/2009	PM2.5		12	1.108	0.111
09-U468	S1-03MOD-C	Tunel	24/06/2009	PM2.5		12	1.11	0.111
09-U469	E2-01ALTA-C	Tunel	25/06/2009	PM2.5		12	1.082	0.108
09-U470	S2-01ALTA-C	Tunel	25/06/2009	PM2.5		12	1.083	0.108
09-U471	E2-01MOD-C	Tunel	25/06/2009	PM2.5		12	1.092	0.109
09-U472	S2-01MOD-C	Tunel	25/06/2009	PM2.5		12	1.094	0.109
09-U473	E2-02ALTA-C	Tunel	29/06/2009	PM2.5		12	1.091	0.109
09-U474	S2-02ALTA-C	Tunel	29/06/2009	PM2.5		12	1.091	0.109
09-U475	E2-02MOD-C	Tunel	29/06/2009	PM2.5		12	1.085	0.108
09-U476	S2-02MOD-C	Tunel	29/06/2009	PM2.5		12	1.086	0.109
09-U477	E2-03ALTA-C	Tunel	30/06/2009	PM2.5		12	1.087	0.109
09-U478	S2-03ALTA-C	Tunel	30/06/2009	PM2.5		12	1.088	0.109
09-U479	E2-03MOD-C	Tunel	30/06/2009	PM2.5		12	1.082	0.108
09-U480	S2-03MOD-C	Tunel	30/06/2009	PM2.5		12	1.086	0.109
09-U481	BLANCO1-C	Tunel	22/06/2009	PM2.5		12		
09-U482	BLANCO2-C	Tunel	23/06/2009	PM2.5		12		
09-U483	POLVMTY-C	Tunel	30/06/2009	PM2.5		12		
09-U484	POLVSP-C	Tunel	30/06/2009	PM2.5		12		
09-U485	POLV1-C	Tunel	27/06/2009	PM2.5		12		
09-U486	POLV2-C	Tunel	30/06/2009	PM2.5		12		

Lab ID	Client ID	Units	Cl	Cl Unc.	NO3	NO3 Unc.	SO4	SO4 Unc.	Na	Na Unc.
09-U457	E1-01ALTA-C	ug/m3	1.400	0.156	1.290	0.144	8.790	0.981	41.200	4.600
09-U458	S1-01ALTA-C	ug/m3	1.160	0.130	1.270	0.142	9.670	1.080	39.600	4.440
09-U459	E1-01MOD-C	ug/m3	1.120	0.124	2.570	0.287	14.100	1.580	30.900	3.450
09-U460	S1-01MOD-C	ug/m3	0.988	0.110	1.980	0.221	12.300	1.380	40.400	4.500
09-U461	E1-02ALTA-C	ug/m3	2.990	0.334	1.020	0.113	6.490	0.724	40.500	4.510
09-U462	S1-02ALTA-C	ug/m3	0.000	0.904	0.000	0.904	9.550	1.070	39.700	4.460
09-U463	E1-02MOD-C	ug/m3	0.000	0.900	1.240	0.139	10.900	1.220	40.600	4.530
09-U464	S1-02MOD-C	ug/m3	1.040	0.116	1.650	0.185	12.200	1.370	42.800	4.770
09-U465	E1-03ALTA-C	ug/m3	1.340	0.149	1.110	0.123	10.800	1.200	41.400	4.610
09-U466	S1-03ALTA-C	ug/m3	1.070	0.120	1.070	0.120	11.100	1.240	41.500	4.650
09-U467	E1-03MOD-C	ug/m3	1.190	0.133	5.400	0.604	15.800	1.770	43.300	4.850
09-U468	S1-03MOD-C	ug/m3	1.280	0.143	5.510	0.616	15.600	1.750	43.000	4.800
09-U469	E2-01ALTA-C	ug/m3	0.000	0.924	2.680	0.299	16.100	1.800	45.600	5.090
09-U470	S2-01ALTA-C	ug/m3	0.000	0.923	2.350	0.262	15.800	1.770	43.600	4.860
09-U471	E2-01MOD-C	ug/m3	0.000	0.916	1.150	0.129	12.000	1.340	42.800	4.780
09-U472	S2-01MOD-C	ug/m3	0.969	0.108	0.969	0.108	11.200	1.240	44.300	4.940
09-U473	E2-02ALTA-C	ug/m3	0.000	0.917	1.480	0.166	16.300	1.820	43.200	4.830
09-U474	S2-02ALTA-C	ug/m3	0.000	0.917	1.430	0.160	16.600	1.860	46.800	5.220
09-U475	E2-02MOD-C	ug/m3	1.010	0.113	3.560	0.396	16.000	1.790	47.700	5.310
09-U476	S2-02MOD-C	ug/m3	0.000	0.921	2.910	0.326	15.700	1.760	19.500	2.180
09-U477	E2-03ALTA-C	ug/m3	0.000	0.920	1.010	0.113	14.800	1.660	19.800	2.220
09-U478	S2-03ALTA-C	ug/m3	0.000	0.919	1.120	0.126	15.000	1.680	20.500	2.290
09-U479	E2-03MOD-C	ug/m3	0.961	0.107	4.730	0.528	17.100	1.900	19.900	2.230
09-U480	S2-03MOD-C	ug/m3	1.120	0.126	4.970	0.558	18.200	2.040	20.700	2.320
09-U481	BLANCO1-C	<b>ug/filter</b>	0.000	1.000	0.000	1.000	5.100	0.255	20.600	1.030
09-U482	BLANCO2-C	<b>ug/filter</b>	0.000	1.000	0.000	1.000	5.280	0.264	21.300	1.060
09-U483	POLVMTY-C	<b>ug/filter</b>	0.000	1.000	0.000	1.000	6.680	0.334	19.900	0.996
09-U484	POLVSP-C	<b>ug/filter</b>	0.000	1.000	1.040	0.052	12.000	0.599	21.200	1.060
09-U485	POLV1-C	<b>ug/filter</b>	86.600	4.330	105.000	5.230	2310.000	115.000	163.000	8.140
09-U486	POLV2-C	<b>ug/filter</b>	1.680	0.084	1.520	0.076	17.000	0.850	37.700	1.880

Lab ID	Client ID	Units	NH4	NH4 Unc.	K	K Unc.	OC	OC Unc	EC	EC Unc	TC	TC Unc
09-U457	E1-01ALTA-C	ug/m3	0.000	0.907	1.160	0.129	17.080	3.471	4.112	2.418	21.210	4.809
09-U458	S1-01ALTA-C	ug/m3	0.000	0.904	0.000	0.904	34.500	5.212	9.342	2.798	43.830	7.001
09-U459	E1-01MOD-C	ug/m3	0.000	0.899	0.000	0.899	20.400	3.770	3.917	2.385	24.280	5.064
09-U460	S1-01MOD-C	ug/m3	0.000	0.898	0.000	0.898	30.190	4.744	11.000	2.920	41.190	6.700
09-U461	E1-02ALTA-C	ug/m3	0.000	0.907	0.000	0.907	13.820	3.186	3.188	2.361	17.080	4.451
09-U462	S1-02ALTA-C	ug/m3	0.000	0.904	0.000	0.904	29.840	4.726	12.480	3.067	42.310	6.847
09-U463	E1-02MOD-C	ug/m3	0.000	0.900	0.000	0.900	16.960	3.448	2.970	2.330	19.870	4.676
09-U464	S1-02MOD-C	ug/m3	0.000	0.899	0.000	0.899	27.730	4.502	9.615	2.813	37.450	6.327
09-U465	E1-03ALTA-C	ug/m3	0.000	0.906	0.000	0.906	21.410	3.879	5.630	2.520	26.960	5.334
09-U466	S1-03ALTA-C	ug/m3	0.000	0.904	0.000	0.904	37.000	5.468	11.070	2.941	48.070	7.431
09-U467	E1-03MOD-C	ug/m3	0.000	0.903	0.000	0.903	26.320	4.363	4.830	2.453	31.080	5.729
09-U468	S1-03MOD-C	ug/m3	0.000	0.901	0.000	0.901	37.950	5.553	11.780	2.988	49.620	7.580
09-U469	E2-01ALTA-C	ug/m3	0.000	0.924	0.000	0.924	21.400	3.917	5.290	2.540	26.620	5.362
09-U470	S2-01ALTA-C	ug/m3	0.000	0.923	0.000	0.923	31.250	4.898	8.133	2.748	39.450	6.597
09-U471	E2-01MOD-C	ug/m3	0.000	0.916	0.000	0.916	28.240	4.576	4.626	2.472	32.860	5.925
09-U472	S2-01MOD-C	ug/m3	0.000	0.914	0.000	0.914	33.780	5.139	8.205	2.725	42.010	6.821
09-U473	E2-02ALTA-C	ug/m3	0.000	0.917	0.000	0.917	24.090	4.173	3.201	2.386	27.280	5.402
09-U474	S2-02ALTA-C	ug/m3	0.000	0.917	0.000	0.917	22.330	4.001	4.235	2.446	26.620	5.340
09-U475	E2-02MOD-C	ug/m3	0.000	0.922	0.000	0.922	24.110	4.176	3.871	2.431	27.980	5.473
09-U476	S2-02MOD-C	ug/m3	0.000	0.921	0.000	0.921	24.530	4.227	5.790	2.564	30.390	5.711
09-U477	E2-03ALTA-C	ug/m3	0.000	0.920	0.000	0.920	24.070	4.179	6.668	2.626	30.800	5.747
09-U478	S2-03ALTA-C	ug/m3	0.000	0.919	0.000	0.919	30.220	4.794	7.081	2.655	37.280	6.380
09-U479	E2-03MOD-C	ug/m3	1.070	0.120	0.000	0.924	28.390	4.611	5.357	2.541	33.720	6.038
09-U480	S2-03MOD-C	ug/m3	1.330	0.149	0.000	0.921	24.530	4.227	6.663	2.628	31.270	5.796
09-U481	BLANCO1-C	<b>ug/filter</b>	0.000	1.000	0.000	1.000	17.400	3.276	1.020	2.448	18.480	4.524
09-U482	BLANCO2-C	<b>ug/filter</b>	0.000	1.000	0.000	1.000	12.480	3.024	0.000	2.400	12.480	4.224
09-U483	POLVMTY-C	<b>ug/filter</b>	0.000	1.000	1.220	0.061	47.880	4.800	1.632	2.484	49.560	6.072
09-U484	POLVSP-C	<b>ug/filter</b>	0.000	1.000	1.860	0.093	124.800	8.640	12.360	3.012	136.800	10.450
09-U485	POLV1-C	<b>ug/filter</b>	4.660	0.233	147.000	7.330	2364.000	121.200	889.200	46.920	3252.000	166.800
09-U486	POLV2-C	<b>ug/filter</b>	0.000	1.000	2.420	0.121	145.200	9.636	12.360	3.024	157.200	11.450