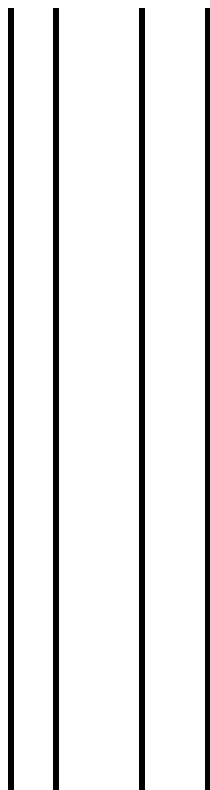


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE QUÍMICA

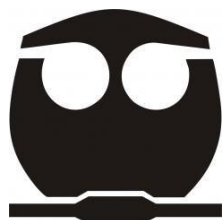
“DETERMINACIÓN DE LAS
CONCENTRACIONES DE COMPUESTOS
ORGÁNICOS VOLÁTILES EN EL SISTEMA DE
TRANSPORTE COLECTIVO DE LA CIUDAD DE
MÉXICO”

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA

PRESENTA:

MAURICIO ÁVALOS PÉREZ



CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX.

2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: María Rafaela Gutiérrez Lara
VOCAL: Profesor: Gema Luz Andraca Ayala
SECRETARIO: Profesor: Iván Yassmany Hernández Paniagua
1er. SUPLENTE: Profesor: Alejandra Mendoza Campos
2º SUPLENTE: Profesor: David Fragoso Osorio

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA, CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX.

ASESOR DEL TEMA:

Dr. Iván Yassmany Hernández Paniagua

SUPERVISOR TÉCNICO:

M. C. José Manuel Hernández Solís

SUSTENTANTE:

Mauricio Ávalos Pérez

Agradecimientos

Al Centro de Ciencias de la Atmosfera (CCA), por facilitar el uso de sus instalaciones e instrumentos y a su plantilla laboral por el apoyo recibido para poder llevar a cabo este proyecto.

A el Dr. Iván Yassmany Hernández Paniagua, mi asesor, por abrirme la puerta para este trabajo quien con su paciencia, dedicación y palabras me llevaron a poder realizar este trabajo y a tener la frente en alto durante todos los desafíos que se presentaron durante la realización del mismo.

Al M. en C. José Manuel Hernández Sólis por su apoyo, confianza y tiempo dedicado a la elaboración de este trabajo de investigación así como su ayuda en la depuración y evaluación de los datos obtenidos en campaña y por la dedicación para mejorar este trabajo.

A la Dra. Gema Luz Andraca Ayala por mi integración al CCA, su genuino apoyo y preocupación por la integridad de mis compañeros y la mía durante los muestreos y dentro del CCA.

Al Ing. Wilfrido Gutiérrez López por el apoyo recibido con el mantenimiento de los instrumentos utilizados en el presente proyecto.

INDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
2	ANTECEDENTES	2
	2.1 LOS COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES	2
	2.2 FUENTES DE EMISIÓN DE COV	2
	2.3 EFECTOS EN LA SALUD Y TOXICIDAD DE LOS COV	4
	2.4 COV DENTRO DE VEHÍCULOS AUTOMORES	6
	2.5 LA EXPOSICIÓN PERSONAL A COV	7
	2.6 TÉCNICAS DE MUESTREO DE COV	12
	2.6.1 MUESTREO PASIVO	12
	2.6.2 MUESTREO ACTIVO	13
	2.6.3 TRATAMIENTO DE LA MUESTRA Y TRANSFERENCIA	13
	2.6.4 EXTRACCIÓN CON SOLVENTES	13
	2.6.5 TERMODESORCIÓN	13
3	OBJETIVOS	14
	3.1 OBJETIVO GENERAL	14
	3.2 OBJETIVOS PARTICULARES	14
4	METODOLOGÍA	14
	4.1 DESARROLLO DEL MUESTREO	16
	4.2 PREPARACIÓN DE TUBOS ADSORBENTES	14
	4.3 CALIBRACIÓN DE LAS BOMBAS DE MUESTREO	15
	4.4 MICROAMBIENTES DE MUESTREO	17
	4.5 ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS	19
	4.6 LIMITE DE DETECCIÓN	21
5	RESULTADOS	23
	5.1 COMPARACIÓN ENTRE TRANSPORTES Y ESTUDIOS PREVIOS	37
6	CONCLUSIONES	39
7	REFERENCIAS	41
8	ANEXOS	44
	8.1 METODOS DE MUESTREO	44
	8.2 DIAGRAMA GENERAL DE MUESTREO	45
	8.3 CONCENTRACIONES DE COV POR DÍA DE MUESTREO	46
	8.4 RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LA PRECISIÓN ANALÍTICA	51
	8.5 BITACORA DE REGISTRO DE AUTOBUSES ABORDADOS EN CAMPAÑAS DE MUESTREO EN METROBÚS	56

1 INTRODUCCIÓN

La calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) es afectada por la presencia de compuestos de origen antropogénico, entre los que se encuentran los contaminantes criterio y otros compuestos con efectos en la salud de la población y el medio ambiente. De acuerdo al Inventario de Emisiones de la Ciudad de México del año 2016 (IE-CDMX), el problema de calidad del aire en la Ciudad de México (CDMX) y la ZMVM es ocasionado mayoritariamente por partículas suspendidas (PM) y ozono (O₃) que superan de forma recurrente los niveles establecidos en la normatividad vigente. Los compuestos orgánicos volátiles (COV) son relevantes debido a que: i) son precursores en la formación de O₃ y ii) algunos tienen potencial tóxico y pueden afectar significativamente la salud humana. En particular, ciertos hidrocarburos policíclicos aromáticos han sido identificados como compuestos carcinogénicos y mutagénicos (WHO, 2000; Ho y Lee, 2002).

En la CDMX, las principales fuentes de emisión de COV están asociadas a actividades antropogénicas, como el uso de solventes en comercios e industrias y uso de combustibles fósiles, las cuales representan anualmente alrededor de 37 y 18 % de las emisiones totales de COV, respectivamente. Sin embargo y a pesar de su relevancia, tanto a nivel mundial y nacional la regulación en términos de emisión y concentración de COV en el ambiente es limitada hasta la fecha. Únicamente en la Unión Europea existe la DIRECTIVA 2004/42/CE que regula las emisiones totales de COV dependiendo de la actividad de emisión. En México, se encuentran en vigencia las normas NOM-123-SEMARNAT-1998 y NOM-121-SEMARNAT-1997 que regulan la emisión de COV provenientes de fuentes fijas. Así, niveles guía y/o normativas tanto para ambientes interiores como exteriores de exposición personal a COV no existen a la fecha en el país.

No obstante, es de suma relevancia conocer los niveles de exposición a COV en ambientes cerrados donde la población pasa periodos de tiempo significativos, como en los medios de transporte durante los traslados cotidianos, información que puede apoyar en la toma de decisiones con miras a proteger la salud de la misma. En el presente estudio se reportan los niveles de exposición personal a COV durante las horas pico de movilidad de la ZMVM en las rutas 1 y del metro y, 1, 2 y 7 del Metrobús. La información obtenida puede ser utilizada para diseñar estrategias que protejan la salud de la población durante los traslados diarios, mediante el trazado de rutas limpias, renovación del parque vehicular e incorporación de aditamentos tecnológicos.

2 ANTECEDENTES

2.1 LOS COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES

La USEPA define a los COV como cualquier compuesto de carbono que participa en reacciones fotoquímicas atmosféricas, excluyendo al monóxido de carbono, dióxido de carbono, ácido carbónico, carburos o carbonatos metálicos y carbonato de amonio, además de aquellos que tienen una reactividad fotoquímica despreciable (Código Federal de Regulaciones 40, capítulo 1). De manera general, esta definición establece que los COV son compuestos químicos orgánicos cuya composición hace posible que se evaporen en condiciones atmosféricas interiores normales de temperatura y presión; 0° C (273.15 °K) y una presión absoluta de 100 kPa (0.98 atm) (IUPACC, 2006) o bien 20° C (293.15 °k) y una presión absoluta de 101.325 kPa (1 atm) (NIST, 2006).

Dado que la volatilidad de un compuesto es generalmente mayor cuanto más baja es la temperatura de punto de ebullición, la volatilidad de los COV puede ser definida también por sus puntos de ebullición. Así, la Unión Europea según la Directiva 2004/42/CE, define a los COV como cualquier compuesto orgánico que tenga un punto de ebullición inicial menor o igual a 250 °C medido a una presión atmosférica estándar de 101.3 kPa.

2.2 FUENTES DE EMISIÓN DE COV

De acuerdo con la USEPA (2019), los COV se emiten desde una variedad de fuentes, incluyendo vehículos automotores, instalaciones de fabricación de productos químicos, refinerías, fábricas, productos comerciales y de consumo, fuentes naturales (biogénicas, principalmente árboles), etc. La Figura 1 muestra un resumen de las emisiones estimadas por sector en la CDMX para el año 2016, donde las fuentes emisoras de carácter federal son centrales generadoras de energía eléctrica, la operación del aeropuerto, la industria química metálica básica, los vehículos de carga con placas federales, los autobuses foráneos y de turismo, por otro lado, las de carácter local son plaguicidas domésticos, autos particulares, artes gráficas etc.

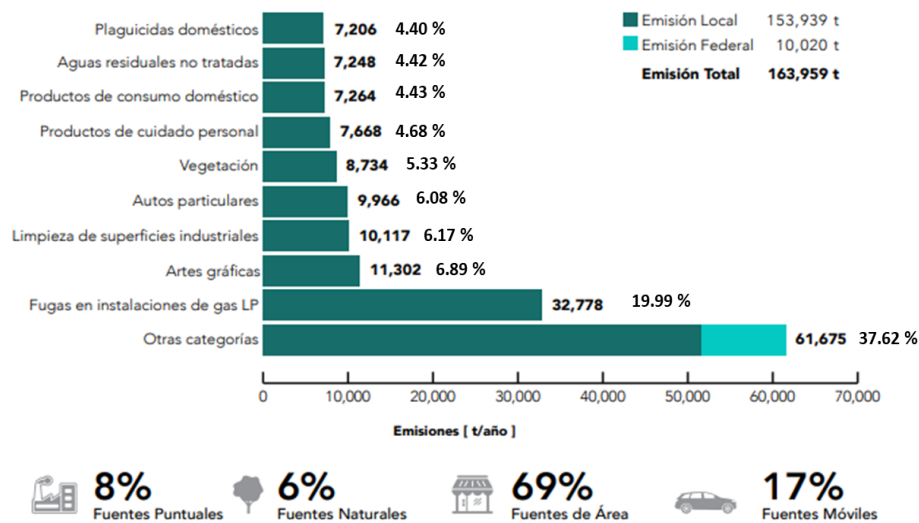


Figura 1. Emisiones en Ton/año de COV totales por diferentes actividades antropogénicas (SEDEMA-CDMX, 2016).

Las emisiones de COV de fuentes antropogénicas según la clasificación de la USEPA (2019) provienen de:

- Quema de combustibles fósiles: Incluye las emisiones de las centrales eléctricas de carbón, gas y petróleo y fuentes industriales, comerciales e institucionales, así como calentadores residenciales y calderas.
- Otros procesos industriales: Incluye producción química, refinación de petróleo, producción de metales y procesos distintos a la combustión de combustibles.
- Vehículos que circulan en carretera: Incluyen automóviles, camiones, autobuses y motocicletas.
- Vehículos y motores que no circulan en carretera: Equipos agrícolas y de construcción, cortadoras de césped, motosierras, barcos, motos de nieve y aviones.

En ambientes intramuros, las principales fuentes de COV incluyen muebles, pisos, alfombras, químicos del hogar, fotocopiadoras e impresoras, construcciones y procesos de restauración.

2.3 EFECTOS EN LA SALUD Y TOXICIDAD DE LOS COV

Los efectos adversos para la salud de la población derivados de la exposición a una sustancia en particular resultan de una amplia gama de reacciones e interacciones que ocurren en el cuerpo humano. Los mecanismos biológicos de los efectos adversos para la salud dependen en gran medida de la estructura química y la reactividad de la sustancia (Maroni et al., 1995). La diversidad química de los COV se refleja en la diversidad de los efectos que estos pueden causar a la salud humana de forma individual. El rango de posibles efectos en la salud de los COV es bastante amplio, y los principales incluyen efectos sensoriales, de irritación y alérgicos, respiratorios y carcinogénicos (Molhave, 2003).

Se ha reportado que la exposición industrial a los COV es generalmente de diez a cien veces mayor que la del entorno doméstico y de la oficina no industrial. En entornos domésticos y de oficina la exposición a COV suele ser de dos a cien veces mayor que en el exterior y en general, lo que resulta en efectos más constantes de la exposición a COV como irritación de los ojos, nariz y garganta, dolor de cabeza, mareos y náuseas (Hess-Kosa, 2002). Además, algunos de los COV como el benceno, el estireno, el tetracloroetileno, el 1,1,1, el tricloroetano, el tricloroetileno, el diclorobenceno, el cloruro de metileno y el cloroformo pueden inducir efectos mutágenos o carcinogénicos (Godish, 2001).

La USEPA reporta un listado de los efectos en la salud por exposición a COV la cual incluye (USEPA, 2015):

- Irritación de ojos, nariz y garganta.
- Dolores de cabeza, pérdida de coordinación y náuseas.
- Daño al hígado, riñón y sistema nervioso central.
- Algunos compuestos orgánicos pueden causar cáncer en animales, algunos son sospechosos o se sabe que causan cáncer en humanos.

También la USEPA (2015) proporciona un listado de síntomas clave asociados a la exposición a COV el cual incluye:

- Dolor de cabeza.
- Malestar de nariz y garganta.
- Reacción alérgica en la piel.
- Irritación de la conjuntiva.
- Disnea.
- Disminución de los niveles séricos de colinesterasa.
- Náusea.
- Emesis.
- Epistaxis.
- Fatiga.
- Mareo.

En Sucre, Colombia, Vargas-Ramos et al. (2014) evaluaron la exposición a BTEX (acrónimo de benceno, tolueno, etilbenceno y xileno) en un grupo de trabajadores en una fábrica de muebles, registrando valores de exposición para benceno tolueno y m/p-xileno de 2.97, 2.15 y 2.79 ppb, respectivamente. Dicha exposición a COV fue correlacionada con dolor muscular en el 89 % del grupo, somnolencia en un 65.9 % y fatiga en un 70.7 %. Al igual que con otros contaminantes, la extensión y la naturaleza del efecto sobre la salud dependerán de muchos factores, incluido el nivel de exposición y el tiempo de exposición a COV. De acuerdo a Hunter et al. (2000), la concentración de COV totales (TCOV) determina una respuesta humana entre los rangos, la Tabla 1 muestra la relación entre los diferentes niveles de TCOV.

Tabla 1. Relación entre los niveles de TCOV en el ambiente y la respuesta humana.

Concentración TCOV < 0.20 mg/m ³	Concentración TCOV: 0.20 - 3 mg/m ³	Concentración TCOV: 3 – 25 mg/m ³	Concentración TCOV > 25 mg/m ³
BUENA	IRRITACIÓN	SUMAMENTE INCOMODO	TÓXICO PARA EL ORGANISMO HUMANO

2.4 NIVELES DE COV DENTRO DE VEHÍCULOS AUTOMORES

Las emisiones de COV de los vehículos que funcionan con gasolina son consideradas como la segunda categoría en importancia después de las fuentes de área en la ZMVM (SEDEMA-CDMX, 2016). Los vehículos ligeros emiten cientos de COV provenientes de la combustión incompleta de la gasolina, sin quemar y de la evaporación del tanque de combustible. En general, las emisiones de COV de los vehículos propulsados por gasolina provienen tanto del tubo de escape como de origen evaporativo diferente al tubo de escape (Rubin et al., 2006).

Las emisiones de COV del tubo de escape incluyen las emisiones del escape y el exceso de emisiones de combustible sin quemar asociadas con el arranque en frío del motor. En contraste, las emisiones por evaporación incluyen a las emisiones conocidas como “Hot Soak” que son impulsadas por el calor residual del motor después de la operación del vehículo (Godish et al., 2015). Las emisiones de COV diurnas también están asociadas con la evaporación de los vapores del tanque de combustible, los cuales aumentan a lo largo del día en respuesta al incremento en la temperatura del ambiente. En menor medida, existen emisiones de COV debidas a pérdidas por evaporación que ocurren mientras los vehículos están en operación y pérdidas en reposo que resultan de la permeación de la gasolina a través de los componentes de goma y plástico del sistema de combustible (Rubin et al., 2006).

Los COV provenientes de emisiones vehiculares pueden penetrar en la cabina de los automóviles particulares (microambientes) cuando circulan en carretera y/o se encuentran detenidos, lo que puede exponer a los pasajeros a mayores niveles de concentración de éstos comparados con los que podrían experimentar en otros transportes. Los niveles de COV dentro de automóviles particulares han sido correlacionados positivamente con la densidad del tráfico e inversamente con la velocidad del automotor y la velocidad del viento (Weisel et al., 1992). Por ejemplo, en 2005 en Heilongjiang, China, Zhao et al. (2005) observaron un total de 48 COV dentro de los automóviles usando el método de desorción térmica-GC-MS. Además, observaron que el porcentaje conjunto de BTEX a la concentración total de COV fue de entre 20 a 30 %.

En China, en las ciudades de Chendu, Shenzhen, Shanghai y Beijing, Bin et al. (2015), realizaron mediciones de COV dentro de las cabinas de vehículos en 4 rutas diferentes bajo las siguientes condiciones de ventilación:

1. Ventilador y recirculación apagada: Una pequeña cantidad de aire externo entra al aire ambiente dentro del vehículo.
2. Ventilador encendido y recirculación apagada: Existe un intercambio de aire entre el aire interno del vehículo y el aire del exterior.
3. Ventilador y recirculación encendidos: Existe intercambio de aire interno-externo, además de una recirculación del aire del interior de la cabina.

Bin et al. (2015) registraron valores promedio para BTEX, estireno y acetona para la condición 1 de 5.24, 17.01, 3.86, 2.8, 1.55 y 6.96 ppb, respectivamente; para la condición 2, para los mismos compuestos, se registraron valores de 4.56, 12.9, 2.39, 4.88, 1.09 y 9.7 ppb, respectivamente; mientras que para la condición 3 se registraron concentraciones de 5.9, 22.64, 3.56, 7.37, 1.73 y 15.97 ppb, respectivamente. Además, para el aire exterior se registraron concentraciones de 6.96, 7.14, 1.45, 2.8, 0.61 y 6.9 ppb para BTEX, estireno y acetona, respectivamente. Ellos concluyeron que las concentraciones de COV aumentaron al interior de los vehículos alrededor de 50 % comparado con los valores promedio cuando la condición de ventilación cambio de 2 a 1, y aumentó aproximadamente un 52 % cuando la condición de ventilación cambio de 2 a 3. Así, el transporte de aire del exterior a la cabina del vehículo debido al uso de ventilador resultó en una disminución de las concentraciones de COV en el interior, mientras que para el escenario 3 la fuente de COV fue el propio vehículo.

2.5 LA EXPOSICIÓN PERSONAL A COV

La exposición personal a COV en ambientes intramuros y extramuros ha sido estudiada en diversas ciudades alrededor del mundo. Por ejemplo, Svecova et al. (2012), midieron la exposición personal en autobuses, automóviles, casas, oficinas, restaurantes y exteriores a BTEX en tres ciudades de la Republica Checa (Ostrava, Karvina y Havirov) durante 24 h en verano e invierno de 2009 (Tabla 2). Ellos reportaron que los valores promedio de las tres ciudades para BTEX fueron 2.25, 9.10, 1.01 y 3.71 ppb, respectivamente. Similarmente, en autobuses públicos, registraron concentraciones promedio para BTEX en invierno de 2.59, 10.37, 0.99, 3.12 y 0.98 ppb, respectivamente, mientras que en verano las

concentraciones promedio fueron de 2.38, 5.46, 0.86, 2.57 y 0.84 ppb, respectivamente. Es de resaltar, que la exposición personal a BTEX en todos los ambientes muestreados fue mayor en invierno para las 3 ciudades reportadas por Svecova et al. (2012) y sobrepasaron los niveles reportados en las estaciones de monitoreo más próximas a los sitios de estudio. La Tabla 2 muestra un resumen de los niveles de exposición a COV por temporada y microambiente en la Republica Checa en verano e invierno de 2009.

Tabla 2. Promedio de las concentraciones de BTEX expresadas en ppb observadas en diferentes microambientes en la Republica Checa en verano e invierno de 2009.

COMPUESTO	MICROAMBIENTE	CONCENTRACIÓN INVIERNO (ppb)	CONCENTRACIÓN VERANO (ppb)
Benceno	Casa	2	2.25
Tolueno		-	-
Etilbenceno		-	-
m-p-Xileno		-	-
o-Xileno		-	-
Benceno	Oficina	2.52	2.29
Tolueno		-	-
Etilbenceno		-	-
m-p-Xileno		2.69	2.24
o-Xileno		-	-
Benceno	Restaurante	2.04	1.75
Tolueno		9.9	4.4
Etilbenceno		-	-
m-p-Xileno		-	-
O-Xileno		-	-
Benceno	Automóvil	1.67	1.52
Tolueno		-	-
Etilbenceno		0.79	0.65
m-p-Xileno		2.48	1.99
o-Xileno		0.8	0.67
Benceno	Transporte público	2.59	2.38
Tolueno		10.37	5.46
Etilbenceno		0.99	0.86
m-p-Xileno		3.12	2.57
o-Xileno		0.98	0.84
Benceno	Exteriores	2.39	1.97
Tolueno		4.42	4.01
Etilbenceno		0.74	0.57
m-p-Xileno		2.22	1.84
o-Xileno		0.72	0.6

Nota: Para los valores no reportados en Svecova et al. (2012) de los diferentes compuestos en distintos ambientes se colocó un guion.

En microambientes de transporte en Boston, Estados Unidos, Chang-Chuan et al. (2012) determinaron la exposición a 6 COV relacionados con emisiones de gasolina (BTEX y

formaldehído) en personas que realizan diariamente el traslado hogar-trabajo-hogar (Tabla 3). Para el transporte motorizado, ellos determinaron concentraciones para BTEX y formaldehído de 5.32, 8.78, 1.34, 1.68, 1.68 y 4.15 ppb, respectivamente, mientras que para metro registraron concentraciones de 2.16, 8.17, 0.58, 2.26, 0.83 y 3.66 ppb, respectivamente. En microambientes de movilidad activa, las concentraciones de exposición caminando fueron de 3.32, 5.25, 0.69, 3.13, 0.94 y 4.48 ppb, respectivamente, y para bicicleta las concentraciones fueron similares a las observadas para peatones de 2.88, 4.32, 0.55, 2.30, 0.69 y 5.13 ppb, respectivamente. Concluyeron que el automóvil presentó las concentraciones totales más altas de COV, que además incrementaron en circulación en áreas urbanas y con el uso de la calefacción. Globalmente, dentro de vehículos la exposición de un individuo a los COV relacionados con el uso de gasolina puede incrementar entre 10 y 20 % la exposición personal, mientras que el tiempo de viaje incrementó la exposición a COV dentro del metro. La Tabla 3 muestra el promedio de las concentraciones de BTEX expresadas en ppb observadas en diferentes medios de transporte en Boston, Estados Unidos en 2012.

Tabla 3. Promedio de las concentraciones de BTEX expresadas en ppb observadas en diferentes medios de transporte en Boston, Estados Unidos en 2012.

COMPUESTO	TRANSPORTE	CONCENTRACION (ppb)
BENCENO	Dentro de un vehículo	5.32
	Metro	2.16
	Caminando	3.32
	Bicicleta	2.88
TOLUENO	Dentro de un vehículo	8.78
	Metro	8.17
	Caminando	5.25
	Bicicleta	4.32
ETILBENCENO	Dentro de un vehículo	1.34
	Metro	0.58
	Caminando	0.69
	Bicicleta	0.55
M/P-XILENO	Dentro de un vehículo	1.68
	Metro	2.26
	Caminando	3.13
	Bicicleta	2.3
O-XILENO	Dentro de un vehículo	1.68
	Metro	0.83
	Caminando	0.94
	Bicicleta	0.69
FORMALDEHIDO	Dentro de un vehículo	4.15
	Metro	3.66
	Caminando	4.48
	Bicicleta	5.13

Similarmente, Lau et al. (2002) investigaron la exposición personal a COV en Hong Kong durante traslados en tren, metro, tren ligero, autobús, autobús con aire acondicionado y ferry (Tabla 4). Ellos concluyeron que la exposición a COV durante los viajes diarios depende en gran medida de la elección del modo de transporte y que los niveles de exposición a COV fueron claramente mayores en transportes que circulan por carretera comparados con aquellos que usan vías férreas o marítimas. Sus resultados indican que la concentración de COV en transportes por carretera proviene principalmente del tráfico vehicular. Además, determinaron pequeñas diferencias entre los pisos superior e inferior en autobuses de doble piso que tienen las ventanas abiertas, ya que dentro del piso inferior los pasajeros están expuestos a concentraciones entre 13 y 20 % mayores de COV en comparación con el piso superior. La Tabla 4 muestra el promedio de las concentraciones de BTEX expresadas en ppb observadas en diferentes medios de transporte en hong Kong en 2002.

Tabla 4. Promedio de las concentraciones a BTEX expresadas en ppb en medios de transporte público en Hong Kong en 2002.

COMPUESTO	TRANSPORTE	CONCENTRACION (ppb)
BENCENO	Metro	1.13
	Autobús con aire acondicionado	1.91
	Autobús sin aire acondicionado	1.5
TOLUENO	Metro	20.91
	Autobús con aire acondicionado	19.34
	Autobús sin aire acondicionado	14.41
ETILBENCENO	Metro	1.52
	Autobús con aire acondicionado	1.59
	Autobús sin aire acondicionado	0.71
M-P-XILENO	Metro	1.43
	Autobús con aire acondicionado	2.05
	Autobús sin aire acondicionado	0.88
O-XILENO	Metro	1.01
	Autobús con aire acondicionado	1.52
	Autobús sin aire acondicionado	0.55

En México, pocos estudios han documentado la exposición personal a COV tanto en ambientes extramuros como intramuros. En ambientes extramuros, Serrano-Trespalcios et al. (2004) examinaron la relación entre los COV medidos en las estaciones de monitoreo de la Red de monitoreo (RAMA) de la CDMX y la exposición personal durante los años 1998 y 1999. Ellos determinaron la exposición personal a 34 COV en 90 voluntarios cerca de 5

estaciones de monitoreo de la RAMA (Merced, ENEP Acatlán, San Agustín, Plateros, UAM-Iztapalapa), observando valores de exposición a 1,4-diclorobenceno, tetracloroetileno, benceno y tolueno de entre 0.079 y 8.38 ppb, los cuales fueron relacionados principalmente con emisiones de automóviles y contribución de productos como desodorantes, alfombras y humo de cigarro. La comparación de medias geométricas de las concentraciones de exposición observadas en dicho estudio con estudios en otras ciudades mostró que la exposición a benceno en la CDMX fue similar a la observada en Nueva Jersey y California EUA a principios de los años 1980s, mientras que para el tolueno en la CDMX fue 1.2 veces superior a las observadas en ciudades de Alemania a principios de los años 1990s.

Más recientemente, Shinohara et al. (2017) investigaron la exposición a COV en la ZMVM en automóviles privados, microbuses, autobuses, metro, Metrobús y trolebuses. Shiohara et al. (2017) determinaron concentraciones de formaldehído, acetaldehído, benceno, tolueno, etilbenceno, m/p-xileno y o-xileno durante la hora pico de tráfico matutina en mayo de 2011 (Tabla 5). En comparación con un estudio de 2002 de Shiohara et al. (2002) las concentraciones de COV en auto particular fueron significativamente más bajas en 2011, excepto para el formaldehído en microbuses que fue 35 % mayor que en 2002. Globalmente, las reducciones oscilaron entre 17 a 42 % (excepto microbuses), 25 a 44 %, 41 a 61 %, 43 a 61 %, 71 a 79 %, 80 a 91 % y 79 a 93 % para formaldehído, acetaldehído, benceno, tolueno, etilbenceno, m / p xileno y o-xileno, respectivamente. Estas reducciones se consideran como resultados positivos de algunas de las acciones implementes en el programa ProAire2002-2010 para mejora de la calidad del aire de la ZMVM. La Tabla 5 muestra el promedio de las concentraciones de BTEX expresadas en ppb observadas en diferentes medios de transporte publico en la CDMX en 2002 y 2011.

Tabla 5. Promedios de las concentraciones de BTEX expresadas en ppb observadas en diferentes medios de transporte público en la CDMX en 2002 y 2011.

COMPUESTO	TRANSPORTE	CONCENTRACION 2002 (ppb)	CONCENTRACIONES 2011 (ppb)	REDUCCION DE CONCENTRACIONES (%)
BENCENO	Automóvil	13.58	6.17	55
	Microbuses	12.36	5.6	55
	Autobuses	8.86	3.47	60
	Metro	3.32	19.5	-
	Metrobús	-	3.06	-
	Trolebús	-	3.51	-

TOLUENO	Automóvil	42.98	16.87	60
	Microbuses	36.62	18.89	48
	Autobuses	27.06	12.34	54
	Metro	16.53	9.47	42
	Metrobús	-	10.45	-
	Trolebús	-	16.37	-
ETILBENCENO	Automóvil	8.57	1.8	79
	Microbuses	6.68	1.53	77
	Autobuses	4.33	1.26	70
	Metro	2.44	0.54	77
	Metrobús	-	0.89	-
	Trolebús	-	1.22	-
M-P-XILENO	Automóvil	25.79	4.28	83
	Microbuses	20.29	2.37	88
	Autobuses	12.97	2.65	79
	Metro	7.51	0.71	90
	Metrobús	-	1.82	-
	Trolebús	-	2.65	-
O-XILENO	Automóvil	9.21	1.81	80
	Microbuses	9.1	0.67	92
	Autobuses	4.74	1	78
	Metro	2.42	0.43	82
	Metrobús	-	0.95	-
	Trolebús	-	1.12	-

2.6 TÉCNICAS DE MUESTREO DE COV

2.6.1 MUESTREO PASIVO

El muestreo pasivo se realiza con cartuchos sin involucrar algún tipo de bombeo y se basa en coleccionar las moléculas de COV por difusión simple de éstas hacia un adsorbente. La selección del soporte está basada en las propiedades fisicoquímicas de los COV, así como en las condiciones de análisis. Los tres tipos de adsorbentes más usados son el carbón activo, adsorbentes inorgánicos y polímeros (Puente et al., 2006). Después de un tiempo de exposición determinado (generalmente de 8 h a 2 semanas), la muestra es llevada al laboratorio donde se analiza cuantitativamente. Es un método simple, económico y permite realizar múltiples mediciones en la zona de estudio con el fin de obtener información sobre la distribución espacial de COV. El inconveniente es que no ofrece una gran exactitud y sólo proporciona información promedio de la concentración de COV.

2.6.2 MUESTREO ACTIVO

El muestreo activo utiliza una bomba para aspirar un volumen conocido de aire por unidad de tiempo a través de un lecho adsorbente sólido. Aunque los muestreadores activos de COV son más costosos y complejos que los muestreadores pasivos, son fáciles de operar y más precisos, pues el tiempo de muestreo puede ser reducido a minutos. Los tubos adsorbentes están hechos de acero inoxidable (Puente et al., 2006). El tiempo de muestreo puede ser de algunos segundos (instantáneo) hasta 24 h. Los tubos de muestreo son ampliamente utilizados ya que permiten con facilidad la colecta de una gran variedad de compuestos. Un inconveniente de este método es la pérdida de compuestos por adsorción en las paredes del tubo y las posibles reacciones entre los compuestos colectados al interior del tubo. Es un método más costoso que el pasivo y cuyo sistema de limpieza es riguroso y requiere de mayor tiempo. Sin embargo, actualmente la limpieza se realiza con la ayuda de técnicas automatizadas.

2.6.3 TRATAMIENTO DE LA MUESTRA Y TRANSFERENCIA

Según el método de muestreo empleado la extracción puede ser realizada con disolvente o por extracción o desorción térmica denominada termodesorción.

2.6.4.1 EXTRACCIÓN CON DISOLVENTES

La extracción por disolventes consiste en usar un disolvente para extraer los COV adsorbidos en el sólido adsorbente. Este método de extracción es cada vez menos empleado para el análisis de COV, ya que se presenta una gran relación de volumen de dilución con respecto al volumen que se puede inyectar al sistema de análisis, lo cual significa ~~conlleva a~~ tener un mayor límite de detección.

2.6.4.2 TERMODESORCIÓN

Esta técnica consiste en extraer los COV del sólido adsorbente empleando temperatura y un flujo de un gas inerte. Los analitos presentes en el sólido adsorbente pasan a través de una trampa que concentra los compuestos a baja temperatura (entre -30 y 10 °C) por un tiempo determinado. Posteriormente, los compuestos son sometidos a una segunda desorción térmica usando un gas inerte a altas temperaturas (entre 250 °C y 280 °C) y transferidos al cromatógrafo de gases (CG) para su separación y análisis. La termodesorción es comúnmente usada para la determinación de COV a baja concentración en la atmósfera ya que permite el análisis de la totalidad de la muestra con un mínimo de manipulación. Sus limitaciones están relacionadas con estabilidad térmica de los compuestos en el momento de la desorción térmica (Puente et al., 2006).

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

- Determinar los niveles de exposición personal a COV's de usuarios del metro y Metrobús de la Ciudad de México.

3.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- Determinar los niveles de exposición personal a COV's en rutas transversales del transporte público de la CDMX.
- Identificar variaciones espacio-temporales en los niveles de exposición personal a COV por medio de transporte y horario.
- Determinar la evolución temporal de COV en transportes con estudios previos.

4 METODOLOGÍA

La metodología de est trabajo consiste en el acondicionamiento de tubos adsorbentes, calibración de equipos de muestreo, muestreo activos de COV y análisis de muestras con la técnica de termodesorción. La Figura B1 del anexo muestra el procedimiento generalizado de la campaña de muestreo.

4.1 PREPARACIÓN DE TUBOS ADSORBENTES

Los tubos adsorbentes tienen el nombre genérico de Air Toxics y están empacados con Carboxen 1003. El fabricante recomienda estos tubos para muestreos de compuestos de C₂ a C₁₄. Cabe mencionar que todos los tubos de Markes International están etiquetados permanentemente con un número de identificación único, en claro formato alfanumérico lo que permitió la fácil identificación en el momento del muestreo y del análisis.

Un día antes de los muestreos, los cartuchos fueron acondicionados a una temperatura de 300 °C con un flujo de nitrógeno grado 5 (UHP) a 100 mL/min durante 3 h. Una vez

acondicionados se sellaron perfectamente y se colocaron en un recipiente con carbón activado. En la Figura 2 se muestra una fotografía del equipo utilizado para acondicionar los cartuchos.



Figura 2. Equipo para acondicionar los cartuchos con gas inerte a una temperatura de 300 °C.

4.2 CALIBRACIÓN DE LAS BOMBAS DE MUESTREO

Para el cálculo de la concentración de los COV es necesario conocer con exactitud el volumen de aire muestreado (Tablas 6 y 7) para ello se utilizaron bombas SKC las cuales fueron calibradas utilizando un burbujometro digital marca Agilent Optiflow 650. En la Figura 3 se muestra una fotografía del equipo utilizado para el muestreo.

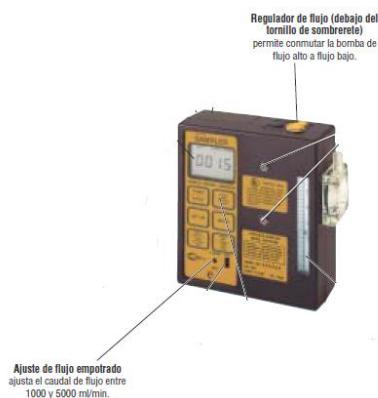


Figura 3. Bombas de muestreo personal SKC modelo 224-PCXR4 utilizadas para la realización del presente proyecto.

Tabla 6. Datos de calibración de las bombas SKC para muestreo de COV en el aire ambiente.

Calibración Bomba A		Calibración Bomba B	
Flujo (mL/min)	78.22	Flujo (mL/min)	76.34
Desviación estándar	0.27	Desviación estándar	0.39

Tabla 7. Datos de calibración de las bombas SKC para muestreo de COV en el aire ambiente.

Calibración Bomba A		Calibración Bomba B	
Flujo (mL/min)	78.17	Flujo (mL/min)	76.25
Desviación estándar	0.71	Desviación estándar	0.51



Figura 4. Bomba SKC conectada al equipo de calibración en el panel izquierdo y la calibración del equipo en el panel derecho.

4.3 DESARROLLO DEL MUESTREO

Los muestreos activos se realizaron muestreos en las líneas 1 y 3 del metro y en las líneas 1 y 2 del Metrobús. Para realizar el muestreo de COV, se utilizaron tubos adsorbentes empacados con Carboxen 1003 (C2-AXXX-5270, MARKES INT.) y para fines de control de calidad se utilizaron 2 bombas de muestreo personal SKC modelo 224-PCXR4 (Figura 3), lo cual permitió verificar las concentraciones observadas.

Para la recolección de las muestras de COV, se hizo pasar aire ambiente a través de tubos empacados con flujos óptimos de muestreo promedio de 78.22 y 76.34 mL/min para las bombas A y B, respectivamente (USEPA TO-17, 1999). La toma de muestra se colocó a la altura nasal del muestreador emulando lo más posible las concentraciones a las que están expuestos los usuarios del transporte. Las temperaturas y presiones en todas las campañas de muestreo se obtuvieron con un monitor de aerosol personal modelo pDR-1500 thermo Scientific, el cual está equipado con sensor de temperatura y de presión

barométrica. Después de los muestreos, los tubos con muestra se guardaron en un recipiente con carbón activado a -4 °C para su posterior análisis en el laboratorio. Los muestreos se realizaron los días miércoles con la finalidad de descartar efectos del fin de semana en las emisiones de COV (Tiburcio, 2019).

4.4 MICROAMBIENTES DE MUESTREO

Se realizaron 3 mediciones en metro para comparar los cambios en la exposición a COV a lo largo del día y 2 viajes en Metrobús en los horarios pico de tráfico vehicular en la temporada seca caliente de 2018. Las mediciones se realizaron a lo largo de las líneas completas del metro y Metrobús que transitan de Sur a Norte y de Oeste a Este. La Tabla 8 muestra los horarios en los que se realizaron los muestreos. La demanda de usuarios así como los trayectos y descripción de las rutas de medición fueron descritos previamente en el estudio de exposición personal a PM_{2.5} realizado por Tiburcio (2019).

Tabla 8. Horarios de muestreo de COV en el metro y Metrobús de la CDMX.

Transporte	Viaje	Horario*
Metro	Mañana	07:30-9:30 CDT
	Medio día	10:15-12:30 CDT
	Tarde	18:00-21:00 CDT
Metrobús	Mañana	07:30-11:30 CDT
	Tarde	18:00-22:00 CDT

NOTA: Los períodos de medición presentaron ligeras variaciones en la duración según el medio de transporte, tráfico, espera en el andén e interrupciones en el flujo vehicular en el caso del Metrobús.

En el metro, las mediciones se realizaron en el 4° vagón al lado de la segunda puerta (Figura 5a). En el Metrobús, para los modelos de 2 y 3 vagones la medición se llevó a cabo en el último vagón similar al metro al lado de la puerta en la parte intermedia (Figura 5b). Con la finalidad de contar con un registro de las características del transporte, condiciones de tránsito y medioambientales durante los muestreos, se registró en una bitácora la marca y modelo de los camiones en los que se realizaron las mediciones (Anexo, Tabla E.1). De igual manera se registraron la hora exacta de encendido y apagado de equipos para determinar los periodos de medición dentro de los microambientes de transporte y se realizaron los cambios correspondientes de tubos adsorbentes y su resguardo en un recipiente con carbón activado (Figura 5c). También, se registró el número de serie del tubo adsorbente utilizado en cada muestreo (Tabla 9) y las condiciones de operación de la bomba (Tabla 10).



Figura 5. a). Ubicación de las zonas de medición de la exposición personal a COV en metro, b) mediciones realizadas en Metrobús y, c) cambio de tubo adsorbente y resguardo en recipiente de carbón activado.

Tabla 9. Datos generales de las campañas de muestreo realizadas.

Campaña 2018		
4-abril-2018 LINEA 3 METRO		
Número de serie tubo	Descripción	Viaje
381999	1° muestreo	Mañana
381998	1° muestreo	
381997	2° muestreo	Mediodía
381991	2° muestreo	
382000	3° muestreo	Tarde
381993	3° muestreo	
11-abril-2018 LINEA 1 METRO		
Número de serie tubo	Descripción	Viaje
381991	1° muestreo	Mañana
381993	1° muestreo	
381996	2° muestreo	Mediodía
381995	2° muestreo	
381997	3° muestreo	Tarde
381999	3° muestreo	
18-abril-2018 LINEA 1 METROBÚS		
Número de serie tubo	Descripción	Viaje
381991	1° muestreo	Mañana
381999	1° muestreo	
381996	2° muestreo	Tarde
382000	2° muestreo	
25-abril-2018 LINEA 2 METROBÚS		
Número de serie tubo	Descripción	Viaje
382000	1° muestreo	Mañana
381994	1° muestreo	
381991	2° muestreo	Tarde
381995	2° muestreo	
23-mayo-2018 LINEA 7 METROBÚS		
Número de serie tubo	Descripción	Viaje
381998	1° muestreo	Mañana
381995	2° muestreo	Tarde
381999	2° muestreo	Tarde

Tabla 10. Condiciones de operación de las bombas SKC durante las campañas de muestreo de 2018.

Tubo	Fecha	Flujo (mL/min)	Volumen (L)	Tiempo (hh:mm:ss)	Temperatura (°K)	Presión (atm)
381999	04-abr	78.22	11.18	02:23:39	300.58	0.7
381998		76.34	10.92	02:23:52	300.58	0.7
381997		78.22	10.17	02:10:33	302.75	0.7
381991		76.34	3.82	00:50:45	302.75	0.7
381993		76.34	10.3	02:15:17	305.45	0.7
382000		78.22	10.64	02:15:57	305.45	0.7
381995	11-abr	76.34	7.79	01:42:01	303.51	0.7
381996		78.22	8.06	01:43:10	303.51	0.7
381991		78.22	11.34	02:25:00	302.15	0.7
381993		76.34	11.06	02:25:04	302.15	0.7
381999		78.22	8.83	01:53:12	303.25	0.7
381997		76.34	8.55	01:52:36	303.25	0.7
381999	18-abr	76.34	16.64	03:38:12	302.01	0.7
381991		78.22	17.05	03:38:10	302.01	0.7
381996		76.34	21.3	04:39:24	307.68	0.7
382000		78.22	21.67	04:37:25	307.68	0.7
382000	25-abr	78.17	12.66	02:42:35	300.55	0.7
381991		76.25	12.35	02:39:05	304.75	0.7
381994		78.17	13.52	02:53:18	300.55	0.7
381995		76.25	13.19	02:53:23	304.75	0.7
381998	23-may	78.64	15.25	03:13:54	299.62	0.7
382000		76.31	14.84	03:14:36	299.62	0.7
381995		78.64	13.45	02:51:08	305.45	0.7
381999		76.31	13.02	02:50:45	305.45	0.7

4.5 ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS

Los tubos de muestreo se trataron con la técnica de termodesorción siguiendo las condiciones descritas en la Tabla 11, y las muestras resultantes se analizaron usando cromatografía de gases acorde con las condiciones descritas en la Tabla 12 y espectrometría de masas (ATD/GC/MS) (Tabla 13). Se siguió el procedimiento de análisis implementado en el laboratorio compartido de cromatografía del Centro de Ciencias de la Atmósfera con base al método TO-17 (USEPA, 1999).

Tabla 11. Condiciones de operación del termodesorbedor.

Termodesorbedor	UNITY-xr, Markes
Temperatura, tiempo de desorción	280 °C, 5 min
Trampa de criofoco.	Air Toxics (de fábrica)
Temperatura y tiempo del criofoco	-10 °C, 6 min
Velocidad de calentamiento, temperatura final, tiempo de desorción.	40 °C/seg, 300 °C, 5 min

Tabla 12. Condiciones de operación del cromatógrafo de gases.

Cromatógrafo de gases	Agilent 7890A
Columna	DB-1, 60 m de largo, 0.25 mm de diámetro interno, 1 µm de espesor de película
Flujo	1 mL/min
Temperatura, tiempo inicial; velocidad de calentamiento; temperatura y tiempo final.	40 °C, 6 min; 4 °C min ⁻¹ ; 230 °C, 3 min

Tabla 13. Condiciones de operación del espectrómetro de masas.

Espectrómetro de masas	Agilent 5975C TAD inert XL MSD
Modo de adquisición	SCAN/SIM
Intervalo del <i>scan</i>	35 a 200 uma
Velocidad del <i>scan</i>	4.3 scans/seg
Fuente iónica	230 °C
Cuadrupolo	150 °C
Línea de transferencia	270 °C

El análisis cuantitativo se realizó usando una mezcla de referencia de COV a una concentración de una parte por millón (nominal) de *Spectra VOC Standards U.S. EPA PAMS, Linde* (Tabla 14). El análisis cualitativo fue por tiempos de retención relativos y por el seguimiento y evaluación de iones característicos (SIM, de sus siglas en inglés).

Tabla 14. Compuestos contenidos en la mezcla utilizada como estándar.

- Acetileno
- Benceno
- N-Butano
- 1-Buteno
- Cis-2-Butano
- Trans-2-Butano
- Ciclohexano
- Ciclopentano
- n-Dodecano
- m-Dietilbenceno
- p-Dietilbenceno
- 2,2-Dimetilbutano
- 2,3-Dimetilbutano
- 2,3-Dimetilpentano
- 2,4-Dimetilpentano
- N-Dodecano
- Etano
- Etil Benceno
- Etileno
- o-Etiltolueno
- m-Etiltolueno
- p-Etiltolueno
- n-Heptano
- n-Hexano
- Isobutano
- Isopentano
- Isopropeno
- Isopropilbenceno
- n-Octano
- n-Pentano
- 1,2,3-Trimetilbenceno
- 1,2,4-Trimetilbenceno
- 1,2,5-Trimetilbenceno
- 2,2,4-Trimetilpentano
- 2,3,4-Trimetilbenceno
- n-Undecano
- o-Xileno
- m/p Xileno

Los criterios que se utilizaron para confirmar la presencia de cada uno de los COV fueron los siguientes:

- a) Cumplir con el tiempo de retención (relativo) con respecto al del estándar de calibración
- b) El ion de cuantificación cumpla con el sentido y magnitud de tiempo esperado.
- c) Se muestran todos los iones de identificación.
- d) Tienen el mismo máximo (mismo en el tiempo de retención).
- e) Se cumplen las abundancias relativas.
- f) Aparece el ion molecular esperado (cuando es visible)

4.6 LÍMITE DE DETECCIÓN

El límite de detección (LOD) se define habitualmente como la cantidad o concentración mínima de sustancia que puede ser detectada con fiabilidad por un método analítico determinado. En términos generales, el LOD de un analito se puede describir como aquella concentración que proporciona una señal en el instrumento significativamente diferente de la señal del <<Blanco>> o <<ruido de fondo>>. Así, el LOD puede ser entendido como la concentración de analito que proporciona una señal igual a la señal del blanco, y_B , más tres veces la desviación estándar del blanco, S_B (Miller, 2002). En la Tabla 15 muestra los valores de las curvas de calibración y del límite de detección de los COV determinados en el presente estudio.

Tabla 15. Valores de las curvas de calibración y del límite de detección de los COV determinados en el presente estudio.

Número	Compuesto	Ordenada	Pendiente	LOD (ppb)
1	ciclopentano	34089	16468	0.11
2	2-metilpentano	9041	46914	0.048
3	3-metilpentano	11755.25	162442	0.005
4	1-hexeno	81090.60	66289	0.054
5	hexano	55911	157968	0.033
7	metilciclopentano	8965.75	290362	0.001
8	2,4-dimetilpentano	1572.25	189991	0.001
10	ciclohexano	0	118793	0
12	2-metilhexano	3358.50	102347	0.006
13	2,3-dimetilpentano	3341.25	150327	0.002
14	3-metilhexano	5047	109345	0.009
15	2,2,4-trimetilpentano	26865.75	535576	0.006
16	heptano	43668.25	120400	0.059
17	metilciclohexano	10383.50	169347	0.014
18	2,3,4-trimetilpentano	10277.50	328759	0.007
19	tolueno	852156.66	370270	0.098
20	2-metilheptano	8584.25	255317	0.007
21	3-metilheptano	7947	168489	0.011
22	octano	62810.25	289496	0.036
24	etilbenceno	205526.5	534834	0.048
25	m/p-xileno	303560.33	389299	0.037
26	estireno	687982.50	254875	0.027
27	o-xileno	242549.50	320216	0.104
28	nonano	55704	242293	0.037
30	isopropilbenceno	11831.50	592141	0.003
31	n-propilbenceno	148935.25	629123	0.029
32	m/p-etiltolueno	54592.25	740365	0.01
33	1,3,5-trimetilbenceno	12588.25	246680	0.005
34	o-etiltolueno	91879.5	543120	0.021
35	1,2,4-trimetilbenceno	124507.25	423045	0.005
36	decano	24433.50	266198	0.016
37	1,2,3-trimetilbenceno	125351.75	435614	0.01
38	m-dietilbenceno	107714	312702	0.05
39	p-dietilbenceno	62605.50	289102	0.022
40	undecano	39793.50	275279	0.023
41	dodecano	525985.75	239885	0.119

En el presente estudio, no se reportan las concentraciones de benceno, debido a que el blanco de calibración mostró una concentración alta, resultando en una curva de calibración que no permitió realizar la cuantificación del mismo en las muestras recolectadas en el transporte público.

5 RESULTADOS

5.1 PRECISIÓN DE LOS MUESTREO

En el presente trabajo se calculó la precisión analítica entre duplicados de las muestras recolectadas las cuales se expresan como porcentaje en las **Tablas D.1 – D.5** del anexo con un límite de precisión del 40 % (este porcentaje se considerará como valor de referencia de aquí en adelante) con la siguiente ecuación tomada de la norma TO-17 de la USEPA:

$$Precision\ analítica = \left(\frac{|X_1 - X_2|}{\bar{X}} \right) \times 100$$

X_1 = Valor de medición tomado de uno de los tubos que se usa en el muestreo,

X_2 = Valor de medición tomado del segundo de los tubos usados en el muestreo,

\bar{X} = Promedio de X_1 y X_2 .

La Tabla D.1 muestra los resultados de precisión analítica para la línea 3 del metro (ML3), la cual en el horario de la mañana mostró que todas las concentraciones de COV determinadas tienen una precisión dentro del valor de referencia. Por la tarde, solo el hexeno, hexano y m/p etiltolueno están fuera del límite con valores de 80 % , 52 % y 76 %, respectivamente y al medio día se observan 9 COV que están fuera de rango de referencia como por ejemplo 1-hexeno, heptano, estireno, nonano, etc.

Se observa que la precisión analítica en la Tabla D.2 para la línea 1 del metro (ML1) muestra un comportamiento parecido al de la ML3, ya que tanto por la mañana como por la tarde una gran mayoría de las concentraciones de los COV cumplen con el valor de referencia límite de 40 %, mientras que al medio día el porcentaje de precisión se eleva por encima del 40 %, al igual que en la ML3, para la mayoría de los COV muestreados.

Para las líneas 1 y 2 del Metrobus (MBL1, 2) en el horario de la mañana, los COV presentan una precisión analítica que está dentro del valor de referencia, excepto el metilciclohexano y o-etiltolueno en la MBL1 y 3-metilpentano, estireno, isopropilbenceno y dodecano en la

MBL2. Por la tarde en ambas líneas de Metrobús el porcentaje de precisión se encuentra por encima del 40 % de precisión para una gran mayoría de los COV analizados.

En el horario de la tarde para la línea 7 de Metrobús (MBL7), solo el tolueno con un 43 % presenta un porcentaje ligeramente mayor al límite, es importante mencionar que no se tienen datos de precisión analítica para el horario de la mañana en la MBL7, ya que uno de los tubos adsorbentes del duplicado para este horario presentó fuga.

El aumento en el porcentaje para ambas líneas de metro y para la MBL1 y MBL2 en el horario de medio día puede deberse al aumento de temperatura en el ambiente, lo que pudo haber ocasionado una variación en flujo de aire de las bombas por la dilatación de las conexiones de las mangueras. En la MBL7 no se excede el porcentaje límite en el horario de la tarde, ya que a lo largo de esta ruta la temperatura es constante debido al aire acondicionado con el que cuenta la unidad de transporte.

5.2 EXPOSICIÓN A COV EN RUTAS NORTE-SUR Y ESTE-OESTE

Se presentan a continuación los resultados obtenidos en las campañas de muestreo realizadas en este estudio. Las figuras presentadas muestran los promedios de exposición calculados de las réplicas y las barras de error corresponden a la desviación estándar de los promedios. Los resultados se expresan en ppbv (referidos como ppb de aquí en adelante) y se organizaron de acuerdo a los diferentes horarios y medios de transporte considerados en el presente estudio, lo que en conjunto permite la comparación de los resultados por horario, trayecto y medio de transporte. Los resultados se encuentran organizados por sentido de las rutas de transporte Norte-Sur y Este-Oeste con la finalidad de permitir la comparación de la exposición a COV para rutas similares de los transportes considerados.

La Figura 6 muestra las concentraciones de COV determinadas en la línea ML3 y en la línea MBL1. La concentración total de COV (TCOV) fue menor en los horarios de muestreo de la tarde para ambas líneas (Figura 6b). En el horario de la mañana, la línea ML3 tuvo un valor de TCOV de 49.18 ppb (Figura 6a), el cual es alrededor de 2.5 veces el observado en la línea MBL1 la cual tuvo un valor de TCOV de 20.10 ppb. Consistentemente para el horario

de la tarde, la concentración TCOV en la línea ML3 fue de 33.77 ppb, alrededor de tres veces el determinado en la MBL1 con un valor de TCOV de 10.92 ppb.

Para ambos horarios de muestreo, la línea ML3 tuvo concentraciones más altas que la línea MBL1 para la mayoría de los compuestos observados, excepto en el horario de la tarde donde el octano, m/p-etiltolueno, 1,3,5-trimetilbenceno, 1,2,4-trimetilbenceno y dodecano mostraron concentraciones mayores en la línea MBL1. El tolueno mostró la mayor concentración en ambos medios de transporte y horarios, con concentraciones en la línea ML3 de 9.04 ppb y de 8.71 ppb por la mañana y tarde, respectivamente, mientras que en la línea MBL1 las concentraciones por la mañana fueron de 3.14 ppb y por la tarde de 2.02 ppb.

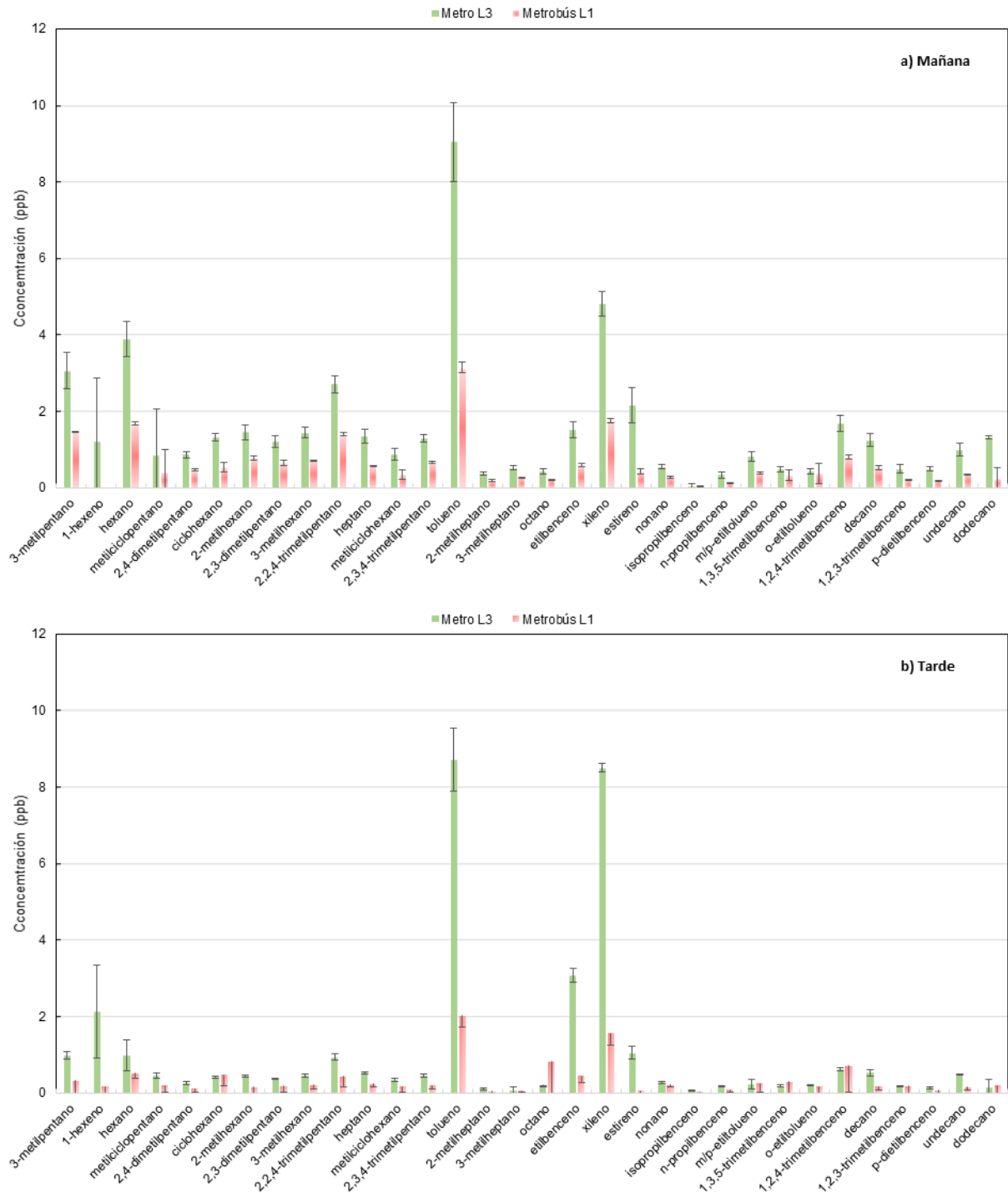


Figura 6. Concentraciones de COV observadas en la línea 3 del metro y línea 1 del Metrobús de la CDMX en los horarios pico de tráfico durante la temporada seca caliente de 2018.

La Figura 7 muestra las concentraciones de los COV observados en la línea ML1 y la línea MBL2. En el horario de la mañana la concentración TCOV en la línea ML1 (18.80 ppb) fue ligeramente mayor que la de la línea MBL2 con un valor de 14.95 ppb (Figura 7a). La concentración TCOV para ambos medios de transporte fue menor por la tarde. Existe una diferencia menor para el horario de la tarde, donde la concentración TCOV en la línea ML1 fue de 14.84 y de 13.23 ppb en la línea MBL2 (Figura 7b).

A pesar de que en el horario de la mañana la concentración TCOV en la línea ML1 fue mayor, la línea MBL2 exhibe concentraciones mayores para la mayoría de los compuestos determinados, como por ejemplo para el 1-hexeno, metilciclopentano, 3-metilheptano, isopropilbenceno, m/p-etiltolueno, etc. Un comportamiento similar fue observado por la tarde, donde sólo el ciclohexano, tolueno, estireno, nonano, decano, 1,2,3-trimetilbenceno, undecano y dodecano mostraron concentraciones mayores en la línea ML1.

Las mayores concentraciones de tolueno influyen en que la concentración TCOV fuera mayor en la línea ML1 para ambos horarios que en la MBL2. Este COV exhibió concentraciones promedio de 5.35 ppb por la mañana y 4.91 ppb por la tarde, las que representan alrededor de 28.5 % y 33.09 % de la concentración TCOV, respectivamente.

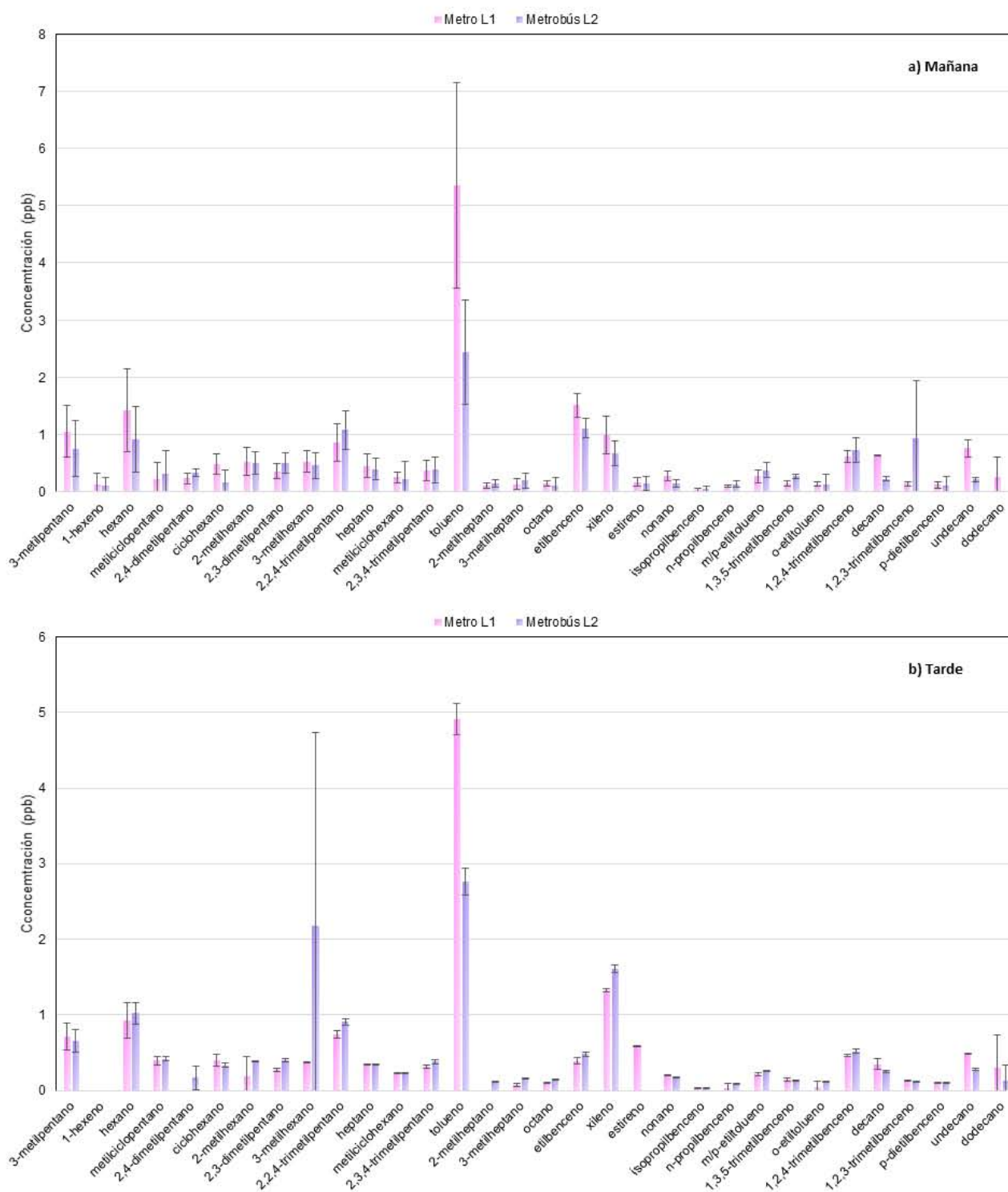


Figura 7. Concentraciones de COV observadas en la línea 1 del metro y línea 2 del Metrobús de la CDMX en los horarios pico de tráfico durante la temporada seca caliente de 2018.

Las concentraciones de COV determinadas en las líneas ML3 y ML1 donde se realizaron muestreos en los horarios de mañana, mediodía y tarde se presentan en la Figura 8. En la línea ML3, la mayor concentración TCOV fue por la mañana (49.18 ppb), mientras que la menor concentración fue determinada al mediodía (26.73 ppb) y tuvo un incremento en el horario de la tarde (33.77 ppb). De manera similar, la línea ML1 tuvo la mayor concentración TCOV por la mañana (18.80 ppb) y la menor al mediodía (14.33 ppb) siendo muy similar a la del horario de la tarde (14.84 ppb).

De forma consistente para todos los horarios de muestreo en las líneas ML3 y ML1, el tolueno fue el compuesto con mayor contribución a la concentración TCOV, representando 18.39 %, 27.4 % y 25.81 % en la ML3 y, 28.5 %, 22.14 % y 33.09 % en la ML1 en el horario de la mañana, mediodía y tarde, respectivamente.

De los 32 COV analizados en la línea ML3, sólo el metilciclohexano, tolueno, octano, n-propilbenceno, m/p etiltolueno, o-etiltolueno, decano y undecano se comportan de forma similar a la TCOV. Las concentraciones de los COV restantes son mayores por la mañana y menores por la tarde, exceptuando etilbenceno, xileno e isopropilbenceno, los cuales mostraron concentraciones mayores por la tarde de 3.06 ppb, 8.50 ppb y 0.08 ppb y menores al mediodía de 0.75 ppb, 2.36 ppb y 0.04 ppb, respectivamente.

Por otro lado, en la ML1 de los 32 COV analizados, sólo el ciclohexano, tolueno, 3-metilheptano, o-etiltolueno y 1,2,3-trimetilbenceno muestran un comportamiento similar a la concentración TCOV. El resto de los COV presentan los picos de concentración por la mañana y disminuyen a lo largo del día, con excepción de octano, estireno, nonano, isopropilbenceno, n-propilbenceno, m/p-etiltolueno y 1,3,5-trimetilbenceno, los cuales exhiben las mayores concentraciones al mediodía con valores de 0.14 ppb, 0.34 ppb, 0.28 ppb, 0.04 ppb, 0.09 ppb, 0.31 ppb y 0.15 ppb, respectivamente.

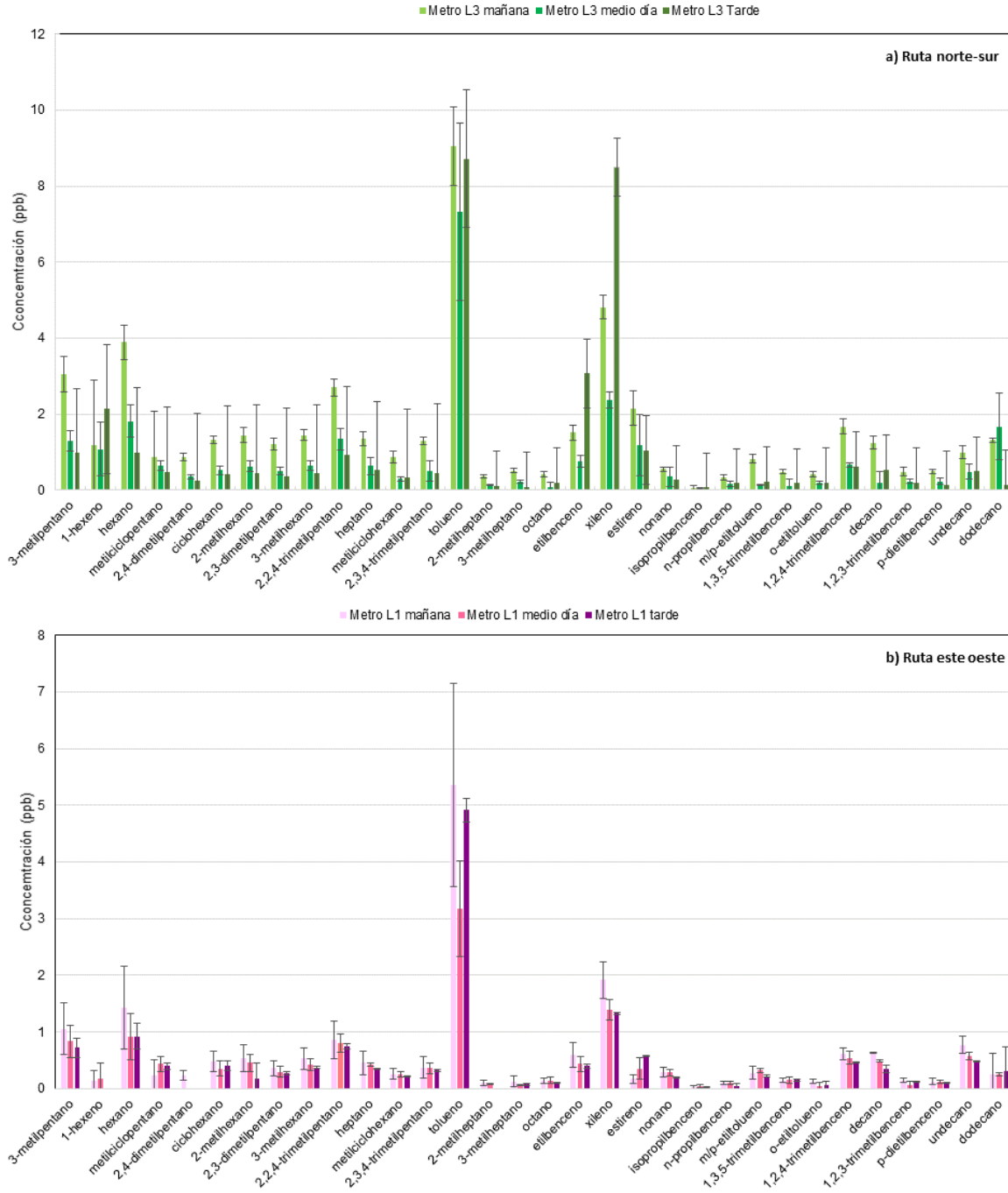


Figura 8. Concentraciones ambiente de COV observadas en las líneas 3 y 1 del metro de la CDMX en los horarios pico de tráfico durante la temporada seca caliente de 2018.

La Figura 9 muestra las concentraciones de COV determinadas en las líneas 1, 2 y 7 del Metrobús (MBL1,2,7). La concentración TCOV fue mayor en los horarios de muestreo de la mañana con respecto a los horarios de la tarde. La línea MBL7 presentó las mayores concentraciones de TCOV, tanto por la mañana (38.47 ppb) como por la tarde (29.84 ppb) en comparación con las otras dos líneas de Metrobús. De los 32 COV analizados en la línea MBL1, 31 de ellos mostraron las mayores concentraciones por la mañana, con excepción del octano, el cual exhibió valores de 0.22 ppb y 0.82 ppb por la mañana y por la tarde, respectivamente.

El tolueno mostró la mayor concentración en la línea MBL7 para ambos horarios de muestreo con valores de 5.63 ppb y 10.71 ppb por la mañana y por la tarde, respectivamente. De los 32 COV determinados en la MBL7, solo el heptano, xileno, 1,3,5-trimetilbenceno, o-etiltolueno, p-dietilbenceno y dodecano mostraron concentraciones mayores por la tarde con valores de 0.58 ppb, 10.71 ppb, 4.04 ppb, 0.24 ppb, 0.19 ppb, 0.19 ppb y 0.25 ppb, respectivamente.

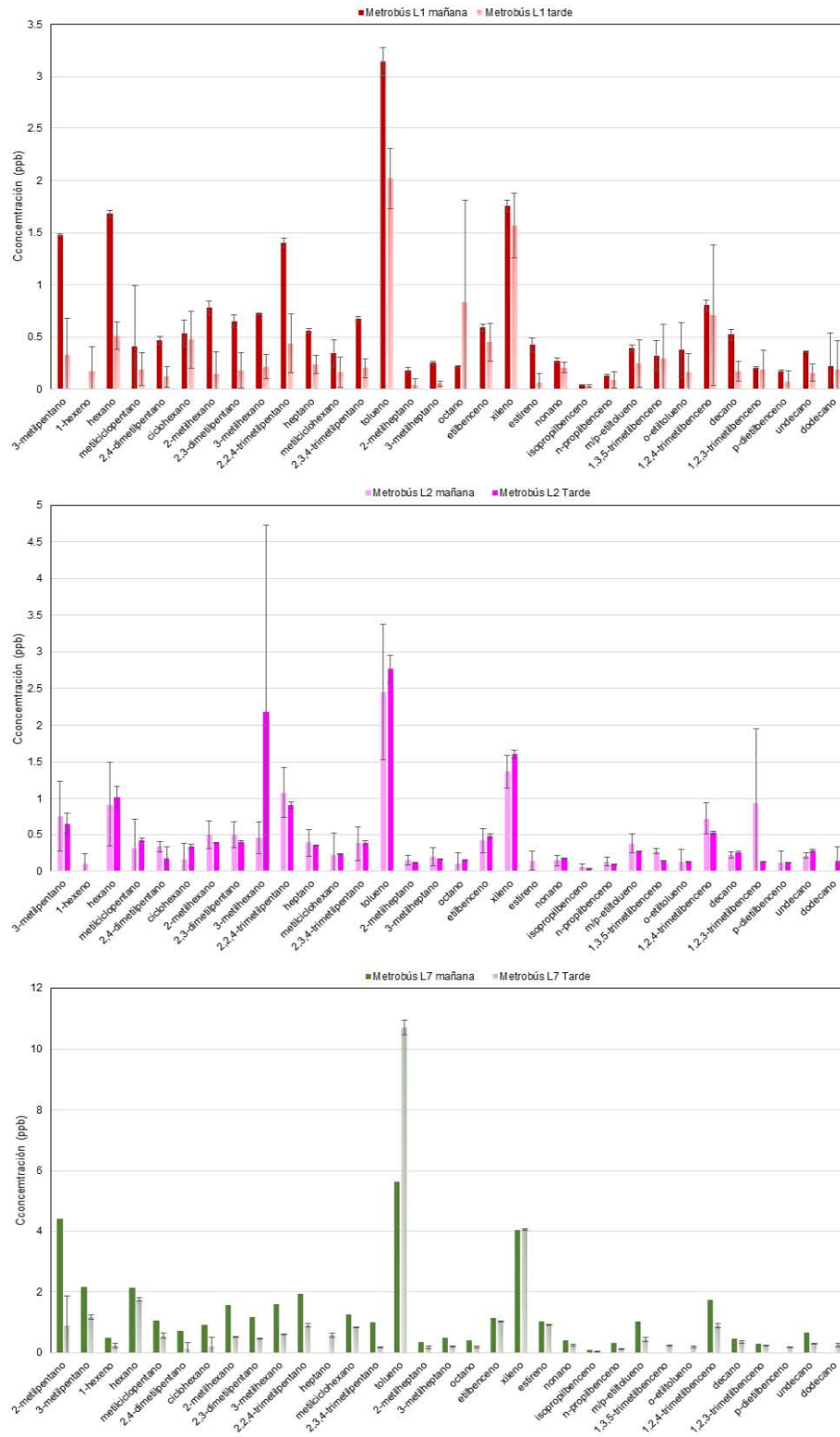


Figura 9. Concentraciones ambiente de COV observadas en las líneas 1, 2 y 7 del Metrobús de la CDMX en los horarios pico de tráfico durante la temporada seca caliente de 2018.

La Figura 10 muestra las concentraciones de COV en el microambiente de las líneas ML3 y ML1. La concentración de TCOV en la línea ML3 fue alrededor de 2 veces mayor que en la línea ML1 para todos los horarios de muestreo. Por lo tanto, para el metro las mayores concentraciones de TCOV se presentan en el trayecto de Sur a Norte y viceversa. Además, la línea ML3 del metro tuvo mayores concentraciones de TCOV en comparación con las líneas de Metrobús de estudio tanto por la mañana como por la tarde.

En el horario de muestreo de la mañana, las concentraciones de los 32 COV determinados son mayores en la línea ML3 con respecto a las determinadas en la línea ML1. Por otra parte, al mediodía, sólo el octano, iso-propilbenceno, 1,3,5-trimetilbenceno, 1,2,4-trimetilbenceno y undecano mostraron mayores concentraciones en la ML1, mientras que por la tarde sólo el 3-metilheptano y dodecano mostraron picos de concentración en la ML1.

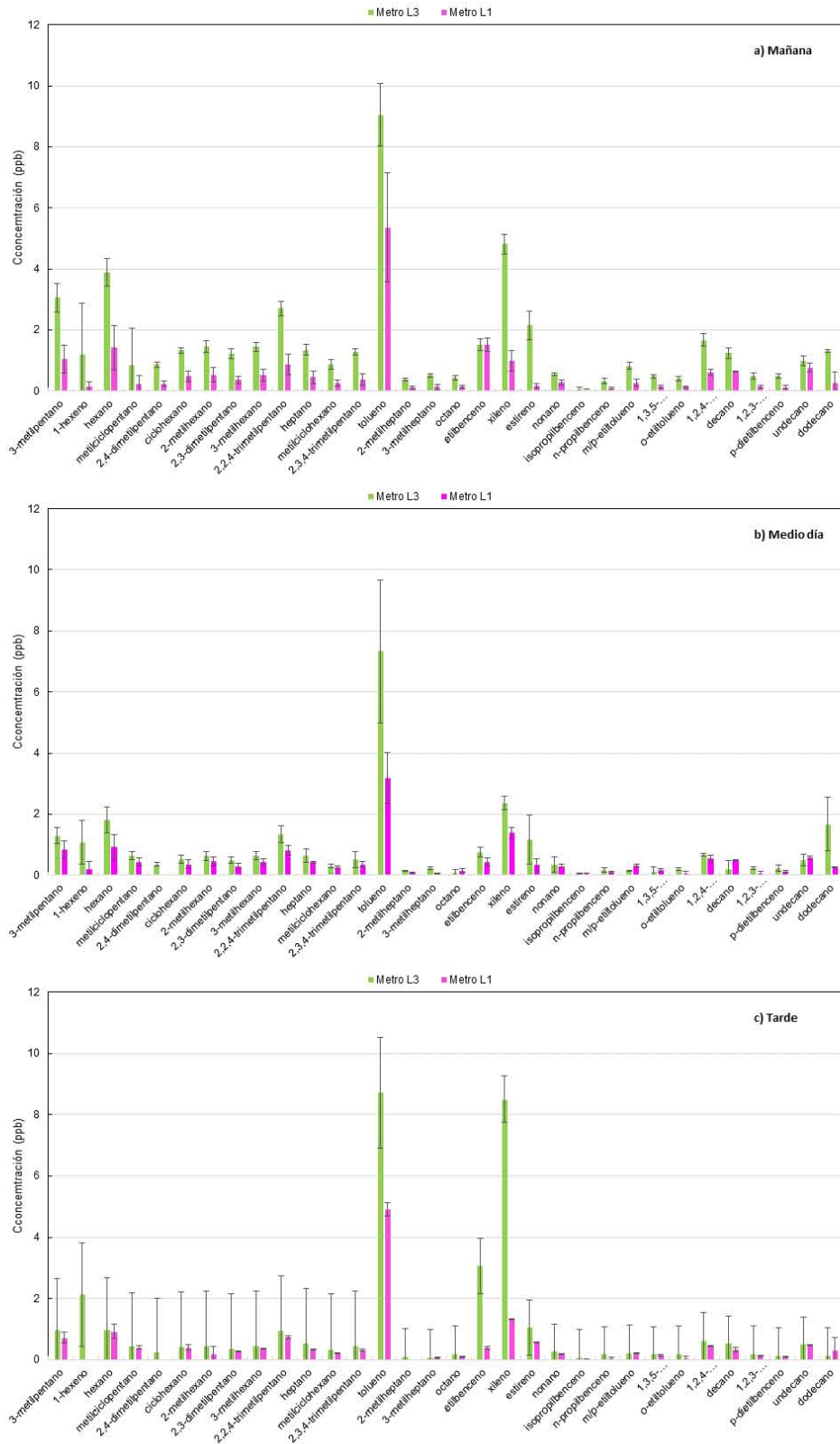


Figura 10. Concentraciones ambiente de COV observadas en la línea 1 y 3 del metro de la CDMX en los horarios pico de tráfico durante la temporada seca caliente de 2018.

La Figura 11 muestra las concentraciones de los COV observados en las líneas MBL1, MBL2 y MBL7. La concentración de TCOV en la línea MBL7 (38.47 ppb y 29.84) fue alrededor del doble de las concentraciones determinadas en la MBL1 (20.10 ppb y 10.92 ppb) y MBL2 (14.25 ppb y 15.02 ppb), tanto para el horario de la mañana como para el de la tarde.

En el horario de la mañana, la línea MBL2 mostró la menor concentración de TCOV en comparación con las demás rutas del metro y Metrobús estudiadas. Por la tarde, la línea MBL1 tuvo la menor concentración de TCOV.

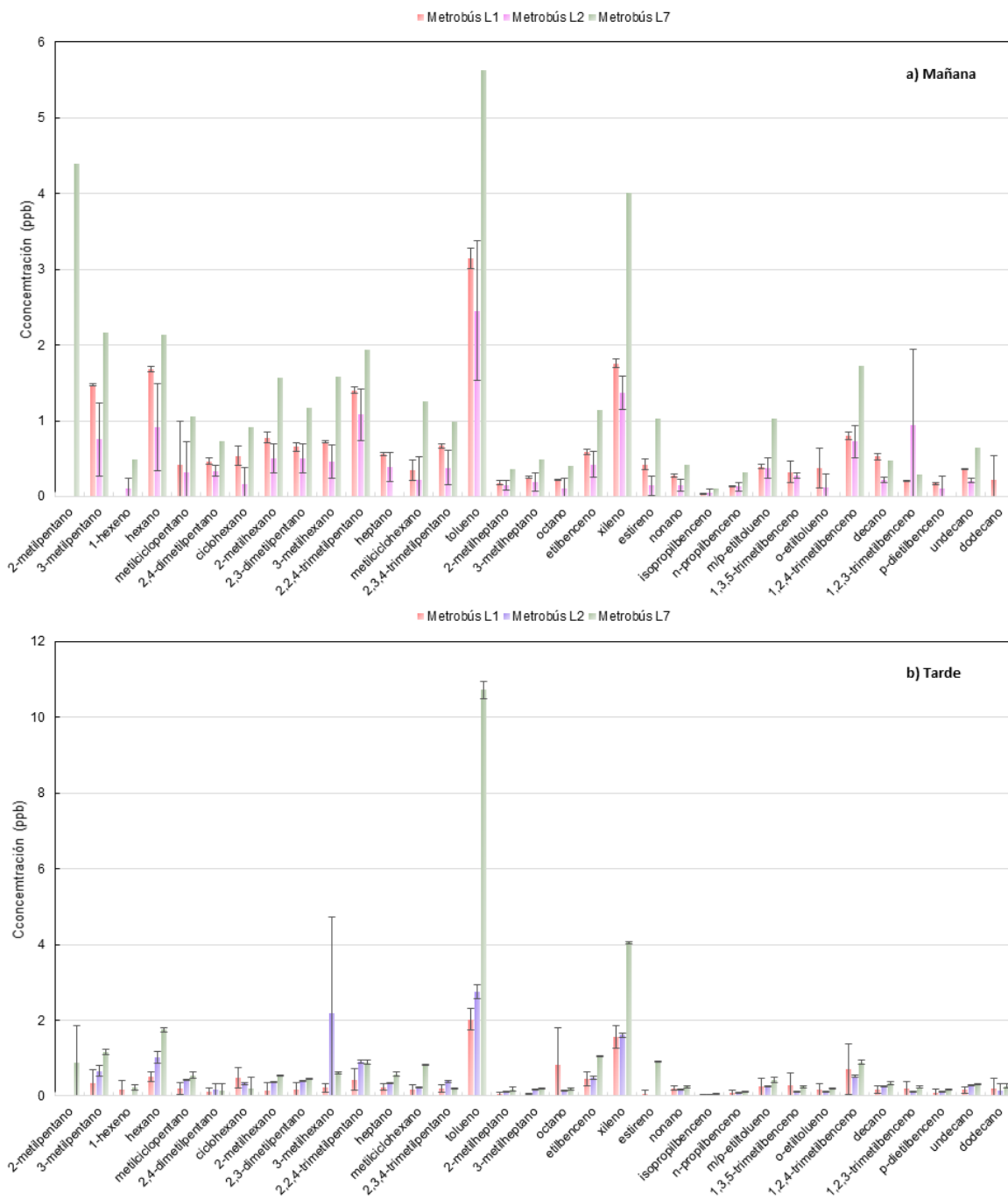


Figura 11. Concentraciones ambiente de COV observadas en las líneas 1, 2 y 7 del Metrobús de la CDMX en los horarios pico de tráfico durante la temporada seca caliente de 2018.

5.3 COMPARACIÓN ENTRE TRANSPORTES Y ESTUDIOS PREVIOS

Shiohara et al. (2005) y Shinohara et al. (2017) realizaron mediciones de las concentraciones ambiente de COV en la línea ML3 de la CDMX en el año 2002 y 2011, respectivamente, en el horario de 07:00 a 09:00 CDT. En 2002, ellos reportaron una concentración de tolueno, etilbenceno y xileno de 16.53 ppb, 2.44 ppb y 9.93 ppb, respectivamente, mientras que para el año 2011 reportaron concentraciones de 10.45, 0.89 ppb y 1.14 ppb, respectivamente como se muestra en la tabla 5.

En el presente estudio las concentraciones de tolueno, etilbenceno, m/p-xileno y o-xileno son menores a las reportadas en 2002 en la línea ML3 con una diferencia alrededor de 7.48 ppb (45 %), 0.93 ppb (0.9 %) y 5.13 ppb (5 %), respectivamente, mientras que comparadas con las determinadas en 2011, la concentración de tolueno es menor con una diferencia de 1.40 ppb (13 %) y los valores de etilbenceno y xileno son mayores con una diferencia de 0.93 ppb (4 %) y 3.66 ppb (23 %), respectivamente. Shinohara et al. (2017) en el año 2011 también realizaron un muestreo en un horario de 07:00 a 09:00 CDT en la línea MBL1 y reportaron concentraciones para tolueno, etilbenceno y xileno de 10.45 ppb, 0.89 ppb y 2.84 ppb, respectivamente, los cuales son mayores a los reportados en el presente trabajo en la línea MBL1 con una diferencia de 7.3 ppb, 0.29 ppb y 1.08 y en la línea MBL2 con una diferencia de 8 ppb, 0.46 ppb, y 1.47 ppb, respectivamente.

La disminución en las concentraciones de BTEX entre los años 2002 y 2011 es probablemente originada por las medidas implementadas como parte del Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la ZMVM 2002-2010 (CAME, 2004). Tales medidas incluyeron en el sector transporte, el rediseño del programa de detección y reacondicionamiento de vehículos ostensiblemente contaminantes y unidades sin verificar, renovación de la flota vehicular de transporte de pasajeros de baja capacidad, sustitución de transporte de pasajeros de mediana capacidad por vehículos nuevos de alta capacidad y se establecieron corredores de transporte. Como resultados de dicho programa se redujeron para el año 2011 las concentraciones de BTEX en Microbuses un 55 %, 48 %, 77 %, 88 % y 93%, respectivamente y en metro con excepción del benceno, 43 %, 78%, 91 % y 82 %, respectivamente como se muestra en la tabla 5(Shinohara et al., 2017).

Se puede presumir que los cambios observados en las concentraciones de BTEX entre los años 2011 y 2018 pueden ser derivados de la aplicación del Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la ZMVM 2011-2020 (SEDEMA, 2018), mismo que contempló como medidas clave el reforzamiento del Programa de Verificación Vehicular Obligatoria y el Programa Hoy No Circula, y la renovación de flota en el sistema de Metrobús y de transporte público.

En un contexto internacional, los niveles de tolueno observados en la línea ML3 del metro de la CDMX en la mañana son menores en alrededor de 11.8 ppb que los reportados en el metro de Hong Kong por Lau et al. (2002), mientras que para etilbenceno y xileno las concentraciones son similares con diferencias de 0.62 ppb, 0.57 ppb y 1.46 ppb, respectivamente. La comparación de las concentraciones de BTEX observadas por la mañana en la línea MBL1 con los valores reportados por Lau et al. (2002) para autobuses sin aire acondicionado en Hong Kong, muestra que sólo los niveles de tolueno son menores en la CDMX en alrededor de 11.24 ppb, mientras que para el etilbenceno, m-p-xileno y o-xileno fueron similares.

Las mayores concentraciones de BTEX observadas por la mañana en la CDMX pueden ser originadas por una mayor emisión de COV durante dicho horario por fuentes vehiculares debido a una mayor flota vehicular en la CDMX. Esto puede ser corroborado con la información del muestreo de la tarde cuando se observó un menor tránsito vehicular durante las campañas de muestreo y probablemente menores emisiones resultando en menores concentraciones de COV determinadas para todos los transportes. Dicho comportamiento fue observado tanto en las líneas de Metrobús como de metro que se estudiaron en el presente trabajo.

6 CONCLUSIONES

Se determinaron los niveles de exposición personal a 32 COV en los transportes del Metrobús y metro de la CDMX. Las mediciones de exposición personal a COV se realizaron durante en los meses de abril y mayo de 2018 durante la temporada seca caliente.

Se determinó que la exposición a COV de los pasajeros depende del medio de transporte usado y del horario de viaje. Los niveles de COV en el metro fueron claramente superiores a los observados en las líneas de Metrobús. Para ambos tipos de transporte, las rutas Sur-Norte y Norte-Sur mostraron mayores niveles ambiente de COV y por ende una mayor exposición personal a los mismos en comparación con las rutas Este-Oeste y Oeste-Este.

Tanto en la línea ML3 como ML1 del metro, las mayores concentraciones de TCOV fueron en el horario de la mañana y las menores al mediodía. Todas las líneas de Metrobús, mostrando picos de concentración de COV significativos por la mañana. El perfil de las concentraciones de COV en las líneas de Metrobús con los mayores promedios en la mañana, es probablemente originado por un mayor número de vehículos en circulación los cuales funcionan con gasolina en comparación con el horario del mediodía y pico de la tarde cuando la circulación de vehículos no se concentra en un par de horas.

Las líneas del metro mostraron mayores concentraciones COV en comparación con las líneas de Metrobús con trayectos similares. Es posible que las mayores concentraciones de COV observadas en el metro sean resultado de la contribución del tráfico vehicular mediante procesos de arrastre al interior de los túneles en combinación con emisiones de COV provenientes de productos de limpieza que son usados para el aseo de los vagones al término de cada recorrido en las estaciones terminales de las líneas.

Se obtuvo información relevante sobre los niveles de exposición personal a COV en el transporte público de la CDMX y se actualizaron los mismos con referencia a estudios existentes. Sin embargo, se recomienda continuar realizando mediciones para identificar posibles cambios en los niveles ambiente de COV derivados de cambios futuros en las rutas, tiempos de viaje, ajustes de ventilación, variaciones estacionales, etc. La realización de más mediciones puede ayudar a clarificar la contribución relativa al la concentración

TCOV de las emisiones de los productos de limpieza que se usan en el metro de forma recurrente. Dicha información puede ser considerada para el diseño de estrategias de mitigación de la exposición de la población a COV, por ejemplo, mediante cambios en el mobiliario urbano como creación de carriles confinados o rutas de transporte público rápidas e implementación de estrategias alternas de limpieza de los vagones del metro.

7 REFERENCIAS

1. Bin, X., Ya, W., Yu, G., Sirui, W., Xiaorui, W., Sihao Z., Tao, L. (2015). Investigation of Volatile Organic Compounds Exposure Inside Vehicle Cabins in China. *Atmospheric Pollution Research*, 86(1), 66-72.
2. Chang-Chuan, C., Spengler, J. D., Ozkaynak, H., Lefkopoulou M. (2012). Commuter Exposures to VOCs in Boston, Massachusetts, *Journal of the Air Waste Management Association*, 41(12), 1594-1600.
3. Comisión ambiental metropolitana (2004). Proyecto para el financiamiento e instrumentación integral de 47 medidas del programa para mejorar la calidad del aire en la zona metropolitana del valle de México 2002-2010. Informe final volumen I.
4. Directiva 2004/42/CE. Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a la limitación de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles debidas al uso de disolventes en determinadas pinturas y barnices y en los productos de renovación del acabado de vehículos por la que se modifica la directiva 1999/13/CE, *Diario Oficial de la Unión Europea*. Recuperado de: <https://www.boe.es/doue/2004/143/L00087-00096.pdf>.
5. Environmental Protection Agency (2015). Air Pollution, an Introductory for Health Professionals. Recuperado de: <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/indoor-air-pollution-introduction-health-professionals-printable-version>.
6. Godish T. (2001). *Indoor Environmental Quality*, 1°ed., CRC Press, 461.
7. Godish, T., Wayne T.D., S. Fu J. (2015). *Air Quality*, 5° ed., CRC Press, 333.
8. Hess-Kosa, K. (2002). *Indoor Air Quality. Sampling Methodologies*, 1° ed., New York, Lewis Publishers.
9. Hunter, R., Oyama, S.T. (2000). *Control of Volatile Organic Compound Emissions, Conventional and Emerging Technologies*, 1° ed., Wiley-Interscience.
10. Indoor Air Quality (IAQ) Technical Overview of Volatile Organic Compounds. Recuperado de: <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/technical-overview-volatile-organic-compounds#6>.

11. Lau, W. L., Chan, L. Y. (2002). Commuter exposure to aromatic VOCs in public transportation modes in Hong Kong. *Science of the Total Environment*, 308(1-3), 143-155.
12. Maroni, M., Seifert, B., Lindvall, T. (1995). *Indoor Air Pollution. A comprehensive reference book*, 1° ed., Elsevier Science.
13. McNaught, A.D., Wilkinson, A. M., Nic J., Jirat, B. K., Jenkins, A. (1997). *IUPAC Compendium of Chemical terminology*, 2° ed., Oxford, Blackwell Scientific Publications.
14. Miller M., Miller C. (2002). *Estadística y Quimiometría para Química Analítica*, 4° ed., Madrid, Prentice Hall.
15. Molhave, L. (2003). Organic compounds as indicators of air pollution. *Indoor Air*. Department of Environmental and Occupational Medicine. The University of Aarhus, Arhus Denmark, 13(6).
16. Puente C., Ramarosan, R. (2006). Medición y análisis de los compuestos orgánicos volátiles en la atmósfera: últimas técnicas, aplicabilidad y resultados a nivel europeo. *Revista ION*, 19(1), 43-47.
17. Rubin, J.I., Kean, A.J., Harley, R.A., Millet, D.B., Goldstein, A.H. (2006). Temperature dependence of volatile organic compound evaporative emissions from motor vehicles. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres / Volume 111, Issue D3*. *J. Geophys. Res.* 111, D03305.
18. Secretaría del Medio Ambiente. Informe avances del Programa ProAire 2011-2020. Recuperado de: <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/sedema-informa-avances-del-programa-proaire-2011-2020>.
19. Secretaria del medio Ambiente de la Ciudad de México. Inventario de emisiones de la Ciudad de México 2016. Direccion General de Gestión de la Calidad del Aire, Direccion de programa de Calidad del Aire e Inventario de Emisiones. Ciudad de México. Septiembre, 2018.
20. Zhao, L., Shen, J., Liu Y. (2005). The sampling apparatus of volatile organic compounds for wood composites. *Journal of Forestry Research*, 16(2), 153-154.
21. Shinohara, N., Angeles, F., Basaldud, R., Cardenas, B., Wakamatsu, S. (2017). Reductions in commuter exposure to volatile organic compounds in Mexico City due to the environmental

- program ProAire2002-2010. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 27, 339-345.
22. Shiohara, N., Fernandez, A., Jimenez, S.B., Yanagisawa, Y. (2005). The commuters exposure to volatile chemicals and carcinogenic risk in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 39, 3481-3489.
 23. Svecova, V., Solansky, I., Topinka, J., Scram, R. J. (2012). Personal exposure to volatile organic compounds in the Czech Republic. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 22(5), 55-60.
 24. Tiburcio, A. (2019). Tesis. Estudio de la exposición personal a PM_{2.5} en el sistema de transporte colectivo de la Ciudad de México. Universidad Nacional Autónoma de México. Obtenida de: <http://oreon.dgbiblio.unam.mx/F?RN=849469161>.
 25. Vargas-Ramos, Y. E., Marrugo-Negrete, J. L. (2014). Exposición a COV en fábricas de muebles de dos poblaciones del norte de Colombia. *Revista de Salud Pública*, 16(6), 834-846.
 26. Weisel, C. P., Lawryk, N.J., Liroy, P. J. (1992). Exposure to emissions from gasoline within automobile cabins. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 2(1), 79-96.
 27. World Health Organization (2000). *Air Quality Guidelines for Europe*, 2° ed., Copenhagen, WHO Regional Publications, European Series, No. 91.

ANEXOS

A. MÉTODOS DE MUESTREO

Los muestreos realizados en metro y Metrobús de la CDMX se llevaron a cabo conforme a lo descrito a continuación.

1. Se realizó la calibración de la bomba de muestreo personal SKC modelo 224-PCXR4 en una fecha anterior a los días seleccionados para el muestreo.
2. Se acondicionaron los tubos adsorbentes un día antes de la fecha de muestreo.
3. Antes de salir del Centro de Ciencias de la Atmósfera, se aseguró la disposición de los equipos a utilizar y se montaron las baterías correspondientes para su correcto funcionamiento en campo.
4. Las mediciones se realizaron en los días y horarios señalados en la Tabla 8.
5. Una vez que se llegó a la estación correspondiente, se esperó en el andén hasta abordar en el primer vagón inmediato a los vagones exclusivos para mujeres y niños.
6. Se registró la hora con minutos y segundos de encendido de equipo
7. Al finalizar el recorrido total de la línea, se operaron los equipos hasta llegar a las jefaturas de estación correspondientes.
8. En las jefaturas de estación se retiró el tubo adsorbente para desorción térmica, se cerró debidamente y se guardaron en un contenedor con carbón activado.
9. Se repitieron los pasos del 5 al 8 en los horarios señalados en la Tabla 8.
10. Una vez realizado el muestreo, todos los tubos se almacenaron en un ambiente seco y frío para su posterior análisis.

B. DIAGRAMA GENERAL DE MUESTREO

La Figura B.1 muestra el procedimiento global de recolección y análisis de muestras de COV tomadas en los diferentes medios de transporte de la CDMX.

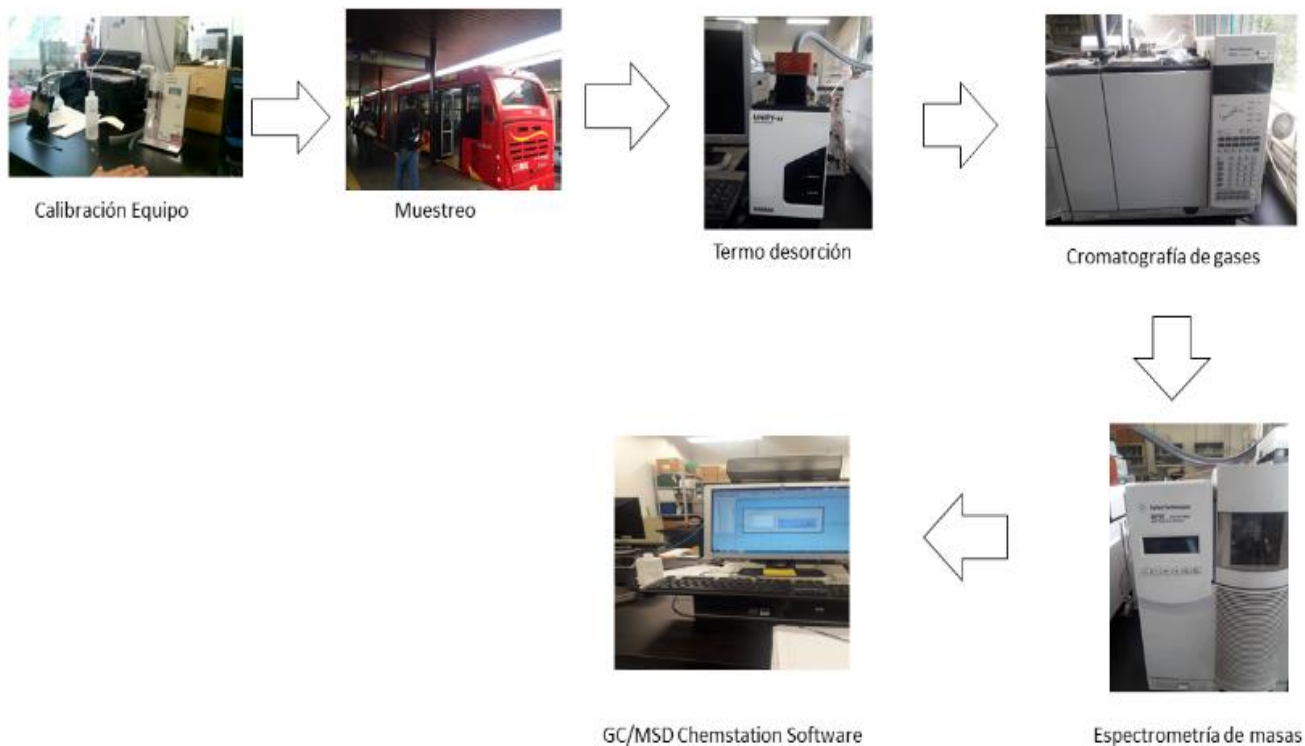


Figura B1. Procedimiento generalizado de la campaña de muestreo.

C. CONCENTRACIONES DE COV POR DÍA DE MUESTREO

Tabla C.1. Valores de concentración en ppb y su desviación estandar para el muestreo realizado el 4 de abril de 2018 en la línea 3 del metro de la CDMX.

No.	Compuesto / tubo	1° 381999	1° 381998	1° 381997	1° 381991	1° 381993	1° 382000
1	ciclopentano	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	2-metilpentano	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	3-metilpentano	3.38 ± 0.17	2.71 ± 0.18	1.10 ± 0.19	1.47 ± 0.51	1.05 ± 0.19	0.92 ± 0.19
4	1-hexeno	2.38 ± 0.21	0.00	0.57 ± 0.60	1.57 ± 0.60	1.27 ± 0.23	2.98 ± 0.22
5	hexano	4.2 ± 0.09	3.57 ± 0.10	1.51 ± 0.28	2.10 ± 0.28	1.27 ± 0.10	0.69 ± 0.10
7	metilciclopentano	1.71 ± 0.07	0.00	0.54 ± 0.2	0.73 ± 0.20	0.50 ± 0.07	0.41 ± 0.07
8	2,4-dimetilpentano	0.93 ± 0.03	0.79 ± 0.03	0.30 ± 0.08	0.39 ± 0.08	0.28 ± 0.03	0.22 ± 0.03
10	ciclohexano	1.39 ± 0.08	1.25 ± 0.09	0.42 ± 0.23	0.60 ± 0.23	0.43 ± 0.09	0.39 ± 0.08
12	2-metilhexano	1.58 ± 0.05	1.31 ± 0.05	0.51 ± 0.16	0.73 ± 0.16	0.47 ± 0.06	0.43 ± 0.06
13	2,3-dimetilpentano	1.32 ± 0.06	1.10 ± 0.06	0.42 ± 0.18	0.56 ± 0.18	0.38 ± 0.07	0.35 ± 0.06
14	3-metilhexano	1.53 ± 0.03	1.34 ± 0.04	0.54 ± 0.10	0.73 ± 0.10	0.48 ± 0.04	0.42 ± 0.04
15	2,2,4-trimetilpentano	2.86 ± 0.03	2.54 ± 0.03	1.14 ± 0.08	1.53 ± 0.08	0.99 ± 0.03	0.87 ± 0.03
16	heptano	1.47 ± 0.12	1.21 ± 0.12	0.47 ± 0.13	0.79 ± 0.36	0.51 ± 0.13	0.53 ± 0.13
17	metilciclohexano	0.98 ± 0.09	0.75 ± 0.09	0.25 ± 0.10	0.33 ± 0.27	0.30 ± 0.10	0.37 ± 0.1
18	2,3,4-trimetilpentano	1.36 ± 0.02	1.22 ± 0.02	0.31 ± 0.03	0.69 ± 0.07	0.49 ± 0.03	0.41 ± 0.02
19	tolueno	9.77 ± 0.21	8.31 ± 0.22	5.66 ± 0.24	8.98 ± 0.63	9.29 ± 0.24	8.14 ± 0.23
20	2-metilheptano	0.40 ± 0.18	0.34 ± 0.18	0.13 ± 0.20	0.14 ± 0.53	0.13 ± 0.20	0.09 ± 0.19
21	3-metilheptano	0.55 ± 0.02	0.47 ± 0.02	0.18 ± 0.03	0.24 ± 0.07	0.00	0.14 ± 0.03
22	octano	0.47 ± 0.04	0.37 ± 0.04	0.15 ± 0.04	0.00	0.20 ± 0.04	0.20 ± 0.04
24	etilbenceno	1.65 ± 0.08	1.37 ± 0.08	0.63 ± 0.09	0.87 ± 0.24	3.19 ± 0.09	2.93 ± 0.09
25	m/p-xileno	2.62 ± 0.02	2.17 ± 0.02	1.02 ± 0.03	1.34 ± 0.07	4.19 ± 0.03	4.03 ± 0.03
26	estireno	2.47 ± 0.12	1.82 ± 0.12	0.6 ± 0.13	1.74 ± 0.34	1.16 ± 0.13	0.93 ± 0.12
27	o-xileno	2.66 ± 0.44	2.16 ± 0.44	1.05 ± 0.47	1.31 ± 0.25	4.49 ± 0.47	4.28 ± 0.45
28	nonano	0.58 ± 0.10	0.51 ± 0.10	0.17 ± 0.11	0.51 ± 0.30	0.28 ± 0.11	0.26 ± 0.11
30	isopropilbenceno	0.00	0.09 ± 0.06	0.04 ± 0.06	0.05 ± 0.15	0.09 ± 0.06	0.08 ± 0.05
31	n-propilbenceno	0.38 ± 0.05	0.27 ± 0.05	0.11 ± 0.05	0.20 ± 0.14	0.17 ± 0.05	0.18 ± 0.05
32	m/p-etiltolueno	0.91 ± 0.03	0.73 ± 0.04	0.12 ± 0.04	0.14 ± 0.10	0.32 ± 0.04	0.13 ± 0.04
33	1,3,5-trimetilbenceno	0.52 ± 0.04	0.44 ± 0.05	0.23 ± 0.05	0.00	0.20 ± 0.05	0.16 ± 0.05
34	o-etiltolueno	0.46 ± 0.05	0.36 ± 0.05	0.15 ± 0.05	0.21 ± 0.13	0.19 ± 0.05	0.20 ± 0.05
35	1,2,4-trimetilbenceno	1.82 ± 0.06	1.52 ± 0.06	0.62 ± 0.05	0.69 ± 0.18	0.66 ± 0.07	0.59 ± 0.06
36	decano	1.36 ± 0.05	1.12 ± 0.05	0.00	0.39 ± 0.15	0.588 ± 0.05	0.46 ± 0.05
37	1,2,3-trimetilbenceno	0.56 ± 0.04	0.41 ± 0.04	0.18 ± 0.13	0.26 ± 0.13	0.194 ± 0.05	0.19 ± 0.05
38	m-dietilbenceno	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
39	p-dietilbenceno	0.53 ± 0.09	0.45 ± 0.10	0.16 ± 0.28	0.28 ± 0.21	0.15 ± 0.10	0.12 ± 0.10
40	undecano	1.10 ± 0.08	0.86 ± 0.09	0.34 ± 0.25	0.62 ± 0.25	0.49 ± 0.09	0.49 ± 0.09
41	dodecano	1.34 ± 0.03	1.27 ± 0.31	1.05 ± 0.90	2.29 ± 0.90	0.00	0.29 ± 0.09

Tabla C.2. Valores de concentración en ppb para el muestreo realizado el 11 de abril de 2018 en la línea 1 del metro de la CDMX.

No.	Compuesto/tubo	2° 381995	2° 381996	2° 381991	2° 381993	2° 381999	2° 381997
1	ciclopentano	0	0	0	0	0	0
2	2-metilpentano	0	0	0	0	0	0
3	3-metilpentano	1.37 ± 0.25	0.73 ± 0.24	0.63 ± 0.17	1.02 ± 0.18	0.59 ± 0.22	0.842 ± 0.23
4	1-hexeno	0.261 ± 0.30	0.00	0.00	0.36 ± 0.21	0.00	0.00
5	hexano	1.94 ± 0.14	0.90 ± 0.13	0.62 ± 0.09	1.20 ± 0.10	0.76 ± 0.12	1.089 ± 0.12
7	metilciclopentano	0.025 ± 0.10	0.43 ± 0.09	0.34 ± 0.07	0.52 ± 0.07	0.35 ± 0.09	0.44 ± 0.09
8	2,4-dimetilpentano	0.29 ± 0.04	0.16 ± 0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
10	ciclohexano	0.60 ± 0.11	0.35 ± 0.11	0.25 ± 0.08	0.45 ± 0.08	0.34 ± 0.10	0.461 ± 0.10
12	2-metilhexano	0.70 ± 0.08	0.36 ± 0.07	0.35 ± 0.05	0.56 ± 0.05	0.36 ± 0.07	0.00
13	2,3-dimetilpentano	0.45 ± 0.09	0.27 ± 0.08	0.22 ± 0.06	0.36 ± 0.06	0.25 ± 0.08	0.287 ± 0.08
14	3-metilhexano	0.65 ± 0.05	0.39 ± 0.05	0.34 ± 0.03	0.49 ± 0.04	0.36 ± 0.04	0.382 ± 0.05
15	2,2,4-trimetilpentano	1.09 ± 0.04	0.63 ± 0.04	0.69 ± 0.03	0.92 ± 0.03	0.71 ± 0.04	0.775 ± 0.04
16	heptano	0.59 ± 0.18	0.30 ± 0.17	0.41 ± 0.12	0.45 ± 0.12	0.35 ± 0.15	0.339 ± 0.16
17	metilciclohexano	0.32 ± 0.13	0.19 ± 0.13	0.22 ± 0.09	0.27 ± 0.09	0.22 ± 0.11	0.231 ± 0.12
18	2,3,4-trimetilpentano	0.50 ± 0.03	0.24 ± 0.03	0.29 ± 0.02	0.42 ± 0.02	0.33 ± 0.03	0.304 ± 0.03
19	tolueno	6.62 ± 0.31	4.09 ± 0.30	2.58 ± 0.21	3.76 ± 0.22	5.05 ± 0.27	4.765 ± 0.28
20	2-metilheptano	0.13 ± 0.26	0.07 ± 0.25	0.07 ± 0.18	0.08 ± 0.18	0.00	0.00
21	3-metilheptano	0.19 ± 0.03	0.06 ± 0.03	0.06 ± 0.02	0.07 ± 0.02	0.08 ± 0.03	0.05 ± 0.03
22	octano	0.17 ± 0.06	0.11 ± 0.06	0.10 ± 0.04	0.18 ± 0.04	0.10 ± 0.05	0.11 ± 0.05
24	etilbenceno	0.74 ± 0.12	0.43 ± 0.11	0.34 ± 0.08	0.52 ± 0.08	0.36 ± 0.1	0.42 ± 0.11
25	m/p-xileno	1.22 ± 0.03	0.75 ± 0.03	0.56 ± 0.02	0.81 ± 0.02	0.65 ± 0.03	0.68 ± 0.03
26	estireno	0.22 ± 0.17	0.11 ± 0.16	0.21 ± 0.12	0.48 ± 0.12	0.58 ± 0.15	0.58 ± 0.15
27	o-xileno	1.16 ± 0.62	0.68 ± 0.6	0.53 ± 0.42	0.85 ± 0.43	0.64 ± 0.54	0.66 ± 0.56
28	nonano	0.34 ± 0.15	0.22 ± 0.14	0.24 ± 0.10	0.32 ± 0.10	0.20 ± 0.13	0.21 ± 0.13
30	isopropilbenceno	0.04 ± 0.07	0.00	0.02 ± 0.05	0.06 ± 0.05	0.02 ± 0.07	0.03 ± 0.07
31	n-propilbenceno	0.11 ± 0.07	0.08 ± 0.07	0.07 ± 0.05	0.12 ± 0.05	0.07 ± 0.06	0.00
32	m/p-etiltolueno	0.35 ± 0.05	0.19 ± 0.05	0.29 ± 0.03	0.34 ± 0.03	0.20 ± 0.04	0.23 ± 0.05
33	1,3,5-trimetilbenceno	0.17 ± 0.07	0.11 ± 0.06	0.11 ± 0.04	0.19 ± 0.05	0.13 ± 0.06	0.16 ± 0.06
34	o-etiltolueno	0.15 ± 0.07	0.1 ± 0.06	0.09 ± 0.05	0.00	0.00	0.10 ± 0.06
35	1,2,4-trimetilbenceno	0.68 ± 0.09	0.54 ± 0.54	0.46 ± 0.06	0.62 ± 0.06	0.45 ± 0.08	0.46 ± 0.08
36	decano	0.63 ± 0.07	0.64 ± 0.07	0.46 ± 0.05	0.49 ± 0.05	0.29 ± 0.06	0.39 ± 0.07
37	1,2,3-trimetilbenceno	0.16 ± 0.06	0.11 ± 0.06	0.11 ± 0.04	0.00	0.13 ± 0.06	0.12 ± 0.06
38	m-dietilbenceno	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
39	p-dietilbenceno	0.16 ± 0.14	0.08 ± 0.01	0.09 ± 0.09	0.13 ± 0.10	0.11 ± 0.09	0.10 ± 0.09
40	undecano	0.87 ± 0.12	0.66 ± 0.12	0.52 ± 0.08	0.61 ± 0.09	0.49 ± 0.11	0.48 ± 0.11
41	dodecano	0.51 ± 0.44	0.00	0.27 ± 0.08	0.23 ± 0.09	0.61 ± 0.39	0.00

Tabla C.3. Valores de concentración en ppb para el muestreo realizado el 18 de abril de 2018 en la línea 1 del Metrobús de la CDMX.

No.	Compuesto/tubo	3° 381999	3° 381991	3° 381996	3° 382000
1	ciclopentano	0.00	0.00	0.00	0.00
2	2-metilpentano	0.00	0.00	0.00	0.00
3	3-metilpentano	1.46 ± 0.12	1.48 ± 0.11	0.07 ± 0.09	0.57 ± 0.09
4	1-hexeno	0.00	0.00	0.00	0.33 ± 0.11
5	hexano	1.7 ± 0.06	1.65 ± 0.06	0.42 ± 0.05	0.6 ± 0.05
7	metilciclopentano	0.00	0.82 ± 0.04	0.07 ± 0.04	0.3 ± 0.04
8	2,4-dimetilpentano	0.49 ± 0.04	0.44 ± 0.02	0.04 ± 0.01	0.18 ± 0.01
10	ciclohexano	0.44 ± 0.05	0.62 ± 0.05	0.28 ± 0.04	0.66 ± 0.04
12	2-metilhexano	0.73 ± 0.04	0.82 ± 0.03	0.00	0.29 ± 0.03
13	2,3-dimetilpentano	0.60 ± 0.04	0.69 ± 0.04	0.06 ± 0.03	0.29 ± 0.03
14	3-metilhexano	0.71 ± 0.02	0.72 ± 0.02	0.13 ± 0.02	0.29 ± 0.02
15	2,2,4-trimetilpentano	1.43 ± 0.02	1.37 ± 0.02	0.23 ± 0.02	0.63 ± 0.02
16	heptano	0.54 ± 0.08	0.57 ± 0.08	0.17 ± 0.06	0.29 ± 0.06
17	metilciclohexano	0.24 ± 0.06	0.43 ± 0.06	0.06 ± 0.05	0.26 ± 0.05
18	2,3,4-trimetilpentano	0.65 ± 0.02	0.69 ± 0.02	0.13 ± 0.01	0.26 ± 0.01
19	tolueno	3.23 ± 0.14	3.05 ± 0.14	2.22 ± 0.11	1.81 ± 0.11
20	2-metilheptano	0.16 ± 0.12	0.2 ± 0.12	0.00	0.08 ± 0.09
21	3-metilheptano	0.24 ± 0.02	0.26 ± 0.02	0.03 ± 0.01	0.07 ± 0.01
22	octano	0.22 ± 0.03	0.22 ± 0.03	1.52 ± 0.02	0.13 ± 0.02
24	etilbenceno	0.56 ± 0.06	0.61 ± 0.05	0.31 ± 0.04	0.58 ± 0.04
25	m/p-xileno	0.82 ± 0.02	0.9 ± 0.02	0.49 ± 0.01	0.93 ± 0.01
26	estireno	0.37 ± 0.08	0.47 ± 0.08	0	0.12 ± 0.06
27	o-xileno	0.86 ± 0.029	0.92 ± 0.28	0.68 ± 0.23	1.01 ± 0.22
28	nonano	0.25 ± 0.07	0.28 ± 0.07	0.24 ± 0.05	0.17 ± 0.05
30	isopropilbenceno	0.04 ± 0.03	0.04 ± 0.03	0.01 ± 0.03	0.03 ± 0.03
31	n-propilbenceno	0.12 ± 0.03	0.13 ± 0.03	0.03 ± 0.03	0.14 ± 0.02
32	m/p-etiltolueno	0.37 ± 0.02	0.41 ± 0.02	0.08 ± 0.02	0.4 ± 0.02
33	1,3,5-trimetilbenceno	0.42 ± 0.03	0.21 ± 0.03	0.06 ± 0.02	0.52 ± 0.02
34	o-etiltolueno	0.56 ± 0.03	0.19 ± 0.03	0.04 ± 0.02	0.28 ± 0.02
35	1,2,4-trimetilbenceno	0.76 ± 0.04	0.84 ± 0.04	0.23 ± 0.03	1.18 ± 0.03
36	decano	0.49 ± 0.03	0.56 ± 0.03	0.1 ± 0.03	0.23 ± 0.03
37	1,2,3-trimetilbenceno	0.2 ± 0.03	0.21 ± 0.03	0.05 ± 0.02	0.32 ± 0.02
38	m-dietilbenceno	0	0	0	0
39	p-dietilbenceno	0.16 ± 0.06	0.18 ± 0.06	0	0.14 ± 0.05
40	undecano	0.36 ± 0.06	0.35 ± 0.06	0.09 ± 0.05	0.21 ± 0.04
41	dodecano	0	0.44 ± 0.20	0	0.38 ± 0.16

Tabla C.4. Valores de concentración en ppb para el muestreo realizado el 25 de abril de 2018 en la línea 2 del Metrobús de la CDMX.

No.	Compuesto/tubo	4° 382000	4° 381991	4° 381994	4° 381995
1	ciclopentano	0	0	0	0
2	2-metilpentano	0	0	0	0
3	3-metilpentano	1.09 ± 0.15	0.41 ± 0.16	0.55 ± 0.14	0.76 ± 0.15
4	1-hexeno	0.20 ± 0.18	0	0	0
5	hexano	1.32 ± 0.08	0.51 ± 0.09	0.91 ± 0.08	1.12 ± 0.08
7	metilciclopentano	0.6 ± 0.06	0.02 ±	0.4 ±	0.43 ±
8	2,4-dimetilpentano	0.38 ± 0.02	0.28 ± 0.02	0.28 ± 0.02	0.06 ± 0.02
10	ciclohexano	0.31 ± 0.07	0	0.31 ± 0.07	0.35 ± 0.07
12	2-metilhexano	0.64 ± 0.05	0.36 ± 0.05	0.39 ± 0.04	0.39 ± 0.05
13	2,3-dimetilpentano	0.63 ± 0.05	0.37 ± 0.05	0.39 ± 0.05	0.41 ± 0.05
14	3-metilhexano	0.61 ± 0.03	0.3 ± 0.03	3.98 ± 0.03	0.38 ± 0.03
15	2,2,4-trimetilpentano	1.32 ± 0.03	0.84 ± 0.03	0.93 ± 0.02	0.88 ± 0.02
16	heptano	0.52 ± 0.11	0.26 ± 0.11	0.35 ± 0.10	0.35 ± 0.10
17	metilciclohexano	0.43 ± 0.08	0	0.24 ± 0.07	0.23 ± 0.08
18	2,3,4-trimetilpentano	0.54 ± 0.02	0.21 ± 0.02	0.4 ± 0.02	0.36 ± 0.02
19	tolueno	3.1 ± 0.19	1.79 ± 0.2	2.89 ± 0.18	2.63 ± 0.18
20	2-metilheptano	0.19 ± 0.16	0.1 ± 0.16	0.12 ± 0.15	0.11 ± 0.15
21	3-metilheptano	0.28 ± 0.02	0.1 ±	0.17 ±	0.16 ±
22	octano	0.2 ± 0.04	0	0.15 ± 0.03	0.13 ± 0.03
24	etilbenceno	0.54 ± 0.07	0.29 ±	0.5 ±	0.45 ±
25	m/p-xileno	0.82 ± 0.02	0.52 ± 0.02	0.85 ± 0.02	0.77 ± 0.02
26	estireno	0.23 ± 0.10	0.05 ± 0.11	0	0
27	o-xileno	0.9 ± 0.38	0.48 ± 0.39	0.83 ± 0.35	0.75 ± 0.37
28	nonano	0.19 ± 0.09	0.09 ± 0.0	0.16 ± 0.08	0.17 ± 0.08
30	isopropilbenceno	0.08 ± 0.05	0.02 ± 0.05	0.03 ± 0.01	0.03 ± 0.01
31	n-propilbenceno	0.17 ± 0.04	0.08 ± 0.04	0.09 ± 0.04	0.08 ± 0.04
32	m/p-etiltolueno	0.46 ± 0.03	0.28 ± 0.03	0.27 ± 0.03	0.26 ± 0.03
33	1,3,5-trimetilbenceno	0.24 ± 0.04	0.3 ± 0.04	0.13 ± 0.04	0.13 ± 0.04
34	o-etiltolueno	0.24 ± 0.04	0	0.12 ± 0.04	0.12 ± 0.04
35	1,2,4-trimetilbenceno	0.87 ± 0.05	0.57 ± 0.06	0.53 ± 0.05	0.5 ± 0.05
36	decano	0.25 ± 0.04	0.19 ± 0.05	0.27 ± 0.04	0.25 ± 0.04
37	1,2,3-trimetilbenceno	0.22 ± 0.04	1.65 ± 0.04	0.12 ± 0.04	0.11 ± 0.04
38	m-dietilbenceno	0	0	0	0
39	p-dietilbenceno	0.22 ± 0.08	0	0.11 ± 0.08	0.11 ± 0.08
40	undecano	0.23 ± 0.07	0.19 ± 0.08	0.28 ± 0.07	0.26 ± 0.07
41	dodecano	0	0	0	0.27 ± 0.20

Tabla C.5. Valores de concentración en ppb para el muestreo realizado el 23 de mayo de 2018 en la línea 7 del Metrobús de la CDMX.

No.	Compuesto/tubo	5° 381998	5° 381995	5° 381999
1	ciclopentano	0	0	0
2	2-metilpentano	4.4 ± 0.32	0.18 ± 0.37	1.57 ± 0.39
3	3-metilpentano	2.17 ± 0.13	1.22 ± 0.15	1.13 ± 0.15
4	1-hexeno	0.49 ± 0.15	0.18 ± 0.17	0.27 ± 0.18
5	hexano	2.14 ± 0.07	1.7 ± 0.08	1.79 ± 0.08
7	metilciclopentano	1.06 ± 0.05	0.49 ± 0.06	0.61 ± 0.06
8	2,4-dimetilpentano	0.73 ± 0.02	0.27 ± 0.02	0
10	ciclohexano	0.92 ± 0.06	0	0.41 ± 0.07
12	2-metilhexano	1.58 ± 0.04	0.54 ± 0.04	0.54 ± 0.05
13	2,3-dimetilpentano	1.17 ± 0.04	0.47 ± 0.05	0.46 ± 0.05
14	3-metilhexano	1.58 ± 0.03	0.6 ± 0.03	0.63 ± 0.03
15	2,2,4-trimetilpentano	1.94 ± 0.02	0.85 ± 0.02	0.93 ± 0.02
16	heptano	0	0.53 ± 0.10	0.63 ± 0.11
17	metilciclohexano	1.25 ± 0.07	0.84 ± 0.08	0.81 ± 0.08
18	2,3,4-trimetilpentano	0.99 ± 0.02	0.19 ± 0.02	0.17 ± 0.02
19	tolueno	5.63 ± 0.16	10.55 ± 0.18	10.88 ± 0.19
20	2-metilheptano	0.36 ± 0.13	0.14 ± 0.15	0.22 ± 0.16
21	3-metilheptano	0.49 ± 0.02	0.21 ± 0.02	0.21 ± 0.02
22	octano	0.41 ± 0.03	0.17 ± 0.03	0.20 ± 0.04
24	etilbenceno	1.14 ± 0.06	1.03 ± 0.07	1.05 ± 0.07
25	m/p-xileno	1.82 ± 0.02	1.8 ± 0.02	1.84 ± 0.02
26	estireno	1.02 ± 0.09	0.92 ± 0.1	0.92 ± 0.1
27	o-xileno	2.2 ± 0.31	2.18 ± 0.36	2.28 ± 0.37
28	nonano	0.42 ± 0.07	0.23 ± 0.08	0.26 ± 0.09
30	isopropilbenceno	0.1 ± 0.04	0.06 ± 0.04	0.06 ± 0.04
31	n-propilbenceno	0.31 ± 0.03	0.13 ± 0.04	0.12 ± 0.04
32	m/p-etiltolueno	1.03 ± 0.03	0.38 ± 0.03	0.48 ± 0.03
33	1,3,5-trimetilbenceno	0	0.23 ± 0.04	0.25 ± 0.04
34	o-etiltolueno	0	0.18 ± 0.04	0.20 ± 0.04
35	1,2,4-trimetilbenceno	1.73 ± 0.04	0.85 ± 0.05	0.94 ± 0.05
36	decano	0.47 ± 0.04	0.32 ± 0.04	0.37 ± 0.04
37	1,2,3-trimetilbenceno	0.29 ± 0.03	0.22 ± 0.04	0.25 ± 0.04
38	m-dietilbenceno	0	0.12 ± 0.06	0
39	p-dietilbenceno	0	0.20 ± 0.08	0.20 ± 0.08
40	undecano	0.65 ± 0.06	0.31 ± 0.07	0.32 ± 0.07
41	dodecano	0	0.3 ± 0.26	0.22 ± 0.27

D. RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LA PRECISIÓN ANALÍTICA

Tabla D.1. Valores de precisión analítica en porcentaje para el muestreo realizado el 4 de abril de 2018 en la línea 3 del metro de la CDMX.

No.	Compuesto/tubo	381999 y 381998			381997 y 381991			381993 y 382000		
		Promedio	X1-X2	Precisión (%)	Promedio	X1-X2	Precisión (%)	Promedio	X1-X2	Precisión (%)
1	ciclopentano	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2-metilpentano	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3-metilpentano	65260	14232	22	193434	-56781	29	19806	1447	7
4	1-hexeno	11099	22198	-	80644	-75186	93	18874	- 15187	80
5	hexano	81364	13133	16	270611	-95330	35	19591	10270	52
7	metilciclopentano	34265	68531	-	178982	-52972	30	17233	2523	15
8	2,4-dimetilpentano	21556	3283	15	61051	-15702	26	5932	851	14
10	ciclohexano	20891	2122	10	56469	-19199	34	6105	160	3
12	2-metilhexano	20626	3827	19	62314	-21606	35	6031	174	3
13	2,3-dimetilpentano	24478	4420	18	69233	-19638	28	6989	187	3
14	3-metilhexano	21374	2792	13	66674	-19743	30	6354	456	7
15	2,2,4-trimetilpentano	194228	23055	12	672077	-199673	30	62662	4497	7
16	heptano	22417	4080	18	79087	-43045	54	8533	-847	10
17	metilciclohexano	19890	5250	26	47813	-13583	28	7344	-1765	24
18	2,3,4-trimetilpentano	59780	6504	11	164122	-124724	76	19559	2138	11
19	tolueno	459008	71537	16	2672160	-1280173	48	412917	29881	7
20	2-metilheptano	13336	2146	16	36162	-3989	11	3858	1094	28
21	3-metilheptano	11937	1872	16	35988	-10357	29	1621	-3243	-
22	octano	17560	4072	23	61491	-23507	38	8263	-490	6
24	etilbenceno	111946	20195	18	415075	-151240	36	208960	5690	3
25	m/p-xileno	258526	47487	18	927918	-278899	30	411090	-7120	2
26	estireno	84277	22446	27	409241	-390732	95	43170	5333	12
27	o-xileno	110757	22128	20	409411	-121066	30	185121	-1655	1
28	nonano	19104	2364	12	90985	-89033	98	9286	235	3
30	isopropilbenceno	4128	-8257	-	28511	-8276	29	6724	341	5
31	n-propilbenceno	31903	9821	31	128759	-84544	66	17013	-1580	9
32	m/p-etiltolueno	85793	17933	21	108153	-24482	23	22678	17273	76
33	1,3,5-trimetilbenceno	16511	2750	17	28357	56715	-	6056	949	16
34	o-etiltolueno	33182	7689	23	115541	-46660	40	15480	-1596	10
35	1,2,4-trimetilbenceno	97190	16563	17	284472	-50025	18	35041	1400	4
36	decano	47233	9076	19	55516	-111032	-	18737	3360	18
37	1,2,3-trimetilbenceno	31669	9419	30	120629	-54129	45	12668	-435	3
38	m-dietilbenceno	0	0	-	0	0	0	0	0	0
39	p-dietilbenceno	22511	3690	16	80321	-48651	61	6442	969	15
40	undecano	40597	9566	24	144212	-84882	59	19405	-1042	5
41	dodecano	53361	2274	4	506039	-389573	77	8383	- 16766	-

Tabla D.2. Valores de Precisión analítica en porcentaje para el muestreo realizado el 11 de abril de 2018 en la línea 1 del metro de la CDMX.

No.	Compuesto/tubo	381995 y 381996			381991 y 381993			381999 y 381997		
		Promedio	X1-X2	Precisión (%)	Promedio	X1-X2	Precisión (%)	Promedio	X1-X2	Precisión (%)
1	ciclopentano	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2-metilpentano	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3-metilpentano	16133	9475	59	17921	-7514	42	12058	-4053	34
4	1-hexeno	1350	2700	-	2112	-4225	-	0	0	0
5	hexano	21664	14983	69	19695	-11217	57	15661	-5206	33
7	metilciclopentano	6618	- 11563	175	17435	-6570	38	12547	-2432	19
8	2,4-dimetilpentano	4107	2205	54	0	0	0	0	0	0
10	ciclohexano	5377	2696	50	5551	-2822	51	4920	-1417	29
12	2-metilhexano	5407	3383	63	6542	-2707	41	2076	4153	-
13	2,3-dimetilpentano	5192	2555	49	6019	-2526	42	4298	-449	10
14	3-metilhexano	5598	2695	48	6290	-1784	28	4353	-183	4
15	2,2,4-trimetilpentano	44239	23398	53	58362	-13724	24	41853	-3222	8
16	heptano	5768	3294	57	7615	-312	4	4958	208	4
17	metilciclohexano	4246	2067	49	5873	-960	16	4188	-14	0
18	2,3,4-trimetilpentano	12260	8464	69	16699	-5168	31	11586	1118	10
19	tolueno	199280	87515	44	168844	-51032	30	200636	12593	6
20	2-metilheptano	2774	1667	60	2844	-130	5	0	0	0
21	3-metilheptano	2179	2163	99	1651	-185	11	1387	525	38
22	octano	4781	1652	35	6556	-3035	46	4179	-14	0
24	etilbenceno	32898	15316	47	34187	-11515	34	24849	-3300	13
25	m/p-xileno	78276	34509	44	77278	-23232	30	59360	-2477	4
26	estireno	13053	2825	22	21121	-8603	41	24877	96	0
27	o-xileno	32352	14770	46	34124	-13072	38	25891	-541	2
28	nonano	7471	2792	37	10360	-2315	22	6223	-90	1
30	isopropilbenceno	1472	2944	-	4026	-3320	82	2044	-371	18
31	n-propilbenceno	8208	2134	26	10826	-3768	35	6905	720	10
32	m/p-etiltolueno	20537	11708	57	33758	-4348	13	18440	-2218	12
33	1,3,5-trimetilbenceno	3604	1384	38	5392	-2396	44	4118	-816	20
34	o-etiltolueno	8132	2901	36	4450	8900	-	3778	-7556	-
35	1,2,4-trimetilbenceno	26403	5622	21	32714	-7837	24	22062	-754	3
36	decano	17409	-272	2	18635	-64	0	10499	-2936	28
37	1,2,3-trimetilbenceno	7879	2195	28	4384	8769	-	7748	396	5
38	m-dietilbenceno	0	0	-	0	0	0	0	0	0
39	p-dietilbenceno	4680	2388	51	5922	-1179	20	4616	102	2
40	undecano	22621	5956	26	23941	-2481	10	15924	539	3
41	dodecano	13785	11742	85	15976	1969	12	19300	8703	45

Tabla D.3. Valores de Precisión analítica en porcentaje para el muestreo realizado el 18 de abril de 2018 en la línea 1 del Metrobús de la CDMX.

No.	Compuesto/tubo	381999 y 381991			381996 y 382000		
		Promedio	X1-X2	Precisión (%)	Promedio	X1-X2	Precisión (%)
1	ciclopentano	0	0	0	0	0	0
2	2-metilpentano	0	0	0	0	0	0
3	3-metilpentano	47819	-577	1	13427	-20215	151
4	1-hexeno	0	0	0	3348	-6697	-
5	hexano	53541	1630	3	20939	-7023	34
7	metilciclopentano	25042	-50084	-	14645	-17143	117
8	2,4-dimetilpentano	17712	1935	11	5595	-6730	120
10	ciclohexano	12754	-4359	34	14195	-11470	81
12	2-metilhexano	16852	-2000	12	4030	-8060	-
13	2,3-dimetilpentano	19952	-2665	13	6859	-8955	131
14	3-metilhexano	16219	-315	2	6116	-4487	73
15	2,2,4-trimetilpentano	152663	6490	4	59773	-53730	90
16	heptano	14391	-705	5	7876	-3669	47
17	metilciclohexano	11880	-6516	55	7289	-8750	120
18	2,3,4-trimetilpentano	47166	-2761	6	17687	-11117	63
19	tolueno	247277	14405	6	201151	40012	20
20	2-metilheptano	9907	-2008	20	2916	-5832	-
21	3-metilheptano	8892	-814	9	2501	-1525	61
22	octano	14113	288	2	63052	104928	166
24	etilbenceno	67409	-5153	8	64267	-35216	55
25	m/p-xileno	143280	-12802	9	148297	-86653	58
26	estireno	31445	-4976	16	12345	-9395	76
27	o-xileno	63364	-4031	6	74768	-27529	37
28	nonano	14690	-1617	11	14048	4354	31
30	isopropilbenceno	5957	-110	2	4731	-3184	67
31	n-propilbenceno	20076	-1618	8	17217	-19415	113
32	m/p-etiltolueno	61900	-5981	10	48884	-62758	128
33	1,3,5-trimetilbenceno	16644	10394	62	18963	-29591	156
34	o-etiltolueno	45509	43400	95	25563	-35235	138
35	1,2,4-trimetilbenceno	71277	-6318	9	78389	-102833	131
36	decano	30382	-3978	13	12612	-9557	76
37	1,2,3-trimetilbenceno	21158	-1177	6	23500	-31048	132
38	m-dietilbenceno	0	0	0	0	0	0
39	p-dietilbenceno	12390	-1076	9	6328	-12656	-
40	undecano	22612	576	3	12553	-9009	72
41	dodecano	18063	-24977	138	17687	-29572	167

Tabla D.4. Valores de Precisión analítica en porcentaje para el muestreo realizado el 25 de abril de 2018 en la línea 2 del Metrobús de la CDMX.

No.	Compuesto/tubo	382000 y 381991			381994 y 381995		
		Promedio	X1-X2	Precisión (%)	Promedio	X1-X2	Precisión (%)
1	ciclopentano	0	0	0	0	0	0
2	2-metilpentano	0	0	0	0	0	0
3	3-metilpentano	20614	12167	59	14768	-9504	64
4	1-hexeno	1523	3046	-	0	0	0
5	hexano	27791	8044	29	20549	-16024	78
7	metilciclopentano	23636	7695	33	11043	-19958	181
8	2,4-dimetilpentano	9767	2390	24	4901	6165	126
10	ciclohexano	5836	-481	-	3346	-6693	-
12	2-metilhexano	8608	3531	41	6251	-876	14
13	2,3-dimetilpentano	12008	4982	41	9162	-1537	17
14	3-metilhexano	40809	-60833	149	5945	-1828	31
15	2,2,4-trimetilpentano	94713	26265	28	71721	-7843	11
16	heptano	8919	2746	31	6338	-2066	33
17	metilciclohexano	9007	4531	-	3228	-6455	-
18	2,3,4-trimetilpentano	25642	6125	24	15775	-8774	56
19	tolueno	184562	542	0	138705	-56353	41
20	2-metilheptano	6601	2499	38	4646	-937	20
21	3-metilheptano	6130	2546	42	3709	-1801	49
22	octano	9004	1796	-	3694	-7388	-
24	etilbenceno	46740	518	1	34500	-15418	45
25	m/p-xileno	108331	-9572	9	83914	-36527	44
26	estireno	13643	8906	65	10713	840	8
27	o-xileno	48235	466	1	35355	-16219	46
28	nonano	7889	791	10	6037	-3513	58
30	isopropilbenceno	6019	4812	80	2707	-1438	53
31	n-propilbenceno	15893	7544	47	11177	-391	4
32	m/p-etiltolueno	44689	20819	47	33418	-257	1
33	1,3,5-trimetilbenceno	7750	3788	49	8557	5966	70
34	o-etiltolueno	17966	9582	-	6332	-12663	-
35	1,2,4-trimetilbenceno	48628	19547	40	38139	4281	11
36	decano	11816	-1602	14	10057	-2998	30
37	1,2,3-trimetilbenceno	14066	6146	44	62993	105161	167
38	m-dietilbenceno	0	0	0	0	0	0
39	p-dietilbenceno	9425	4938	52	3824	-6084	159
40	undecano	13026	-3381	26	11313	-4353	38
41	dodecano	7488	3705	49	13780	-9677	70

Tabla D.5. Valores de Precisión analítica en porcentaje para el muestreo realizado el 23 de mayo de 2018 en la línea 7 del Metrobús de la CDMX.

No.	Compuesto/tubo	381999 y 381995		
		Promedio	X1-X2	Precisión (%)
1	ciclopentano	0	0	0
2	2-metilpentano	6715	-10435	155
3	3-metilpentano	29546	2431	8
4	1-hexeno	3432	-982	29
5	hexano	43302	-1969	5
7	metilciclopentano	26005	-5701	22
8	2,4-dimetilpentano	3933	7865	-
10	ciclohexano	3789	-7577	-
12	2-metilhexano	9046	37	0
13	2,3-dimetilpentano	11114	290	3
14	3-metilhexano	10693	-432	4
15	2,2,4-trimetilpentano	75335	-6631	9
16	heptano	11656	-1771	15
17	metilciclohexano	22125	887	4
18	2,3,4-trimetilpentano	10137	1079	11
19	tolueno	634892	-18186	3
20	2-metilheptano	7513	-3241	43
21	3-metilheptano	5716	2	0
22	octano	9402	-1514	16
24	etilbenceno	90811	-1347	1
25	m/p-xileno	230794	-4547	2
26	estireno	46869	-176	0
27	o-xileno	119869	-4819	4
28	nonano	10391	-1466	14
30	isopropilbenceno	5747	-187	3
31	n-propilbenceno	15318	1096	7
32	m/p-etiltolueno	52717	-12103	23
33	1,3,5-trimetilbenceno	9786	-919	9
34	o-etiltolueno	18493	-2456	13
35	1,2,4-trimetilbenceno	61481	-6174	10
36	decano	15576	-2422	16
37	1,2,3-trimetilbenceno	18899	-2160	11
38	m-dietilbenceno	3911	7822	-
39	p-dietilbenceno	11011	-34	0
40	undecano	15515	-355	2
41	dodecano	17554	3314	19

E. BITACORA DE REGISTRO DE AUTOBUSES ABORDADOS EN CAMPAÑAS DE MUESTREO EN METROBÚS

Tabla E.1. Bitácora de registro de autobuses abordados en la campaña de muestre de Metrobús.

FECHA DE MUESTREO	LINEA DE Metrobús	HORARIO	OPERADOR	MARCA Y MODELO	ESPECIFICACIÓN
18 de abril de 2018	1	Mañana ida	VYC 1063-B		
		Mañana regreso	CISA-1034-B	Volvo 7300 BRT	
		Tarde ida	CISA-1031-B	Biarticulado	
		Tarde regreso	RECSA-1094-B		
25 de abril de 2018	2	Mañana ida	CE4-17MSA-335	Dina Brighter BRT	Motor diésel con tecnología Euro5
		Mañana regreso	PROT-14	Mercedes Benz Gran Viaje	
		Tarde ida	CE4-17MSA-314	Volvo 7300 BRT	
		Tarde regreso	CTT-2354	Articulado	