

Cerón-Bretón, J.G., Espinosa-Guzmán, A.A., García-Martínez, R., Rodríguez-Heredia, R.D. 2025. Niveles y Variación Diurna de BTEX en un Sitio de Ciudad del Carmen, Campeche para la Estación de Verano 2022, p. 7-32. En: . J.G. Cerón Bretón, R. M. Cerón Bretón y M. López Cisneros (ed.). Tópicos Selectos de Contaminación Ambiental. Universidad Autónoma de Campeche. 366 p. ISBN 978-607-8907-33-5. doi 10.26359/EPOMEX01202501.

Niveles y Variación Diurna de BTEX en un Sitio de Ciudad del Carmen, Campeche para la Estación de Verano 2022

*J. G. Cerón-Bretón¹, A. A. Espinosa-Guzmán²,
R. García-Martínez³, R. D. Rodríguez-Heredia¹*

¹Facultad de Química
Universidad Autónoma del Carmen

²Centro de Investigación en Corrosión
CONAHCYT
Universidad Autónoma de Campeche

³Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático
Universidad Nacional Autónoma de México,

Resumen

En México, la información sobre control y prevención de la contaminación atmosférica es escasa, y hay falta de regulación en la calidad del aire. Este estudio tiene como objetivo determinar las concentraciones de benceno, tolueno, p-xilenos y etilbenceno en aire ambiente de un sitio ubicado en Ciudad del Carmen, Campeche y analizar su relación con $PM_{2.5}$ y NO_2 , así como la influencia de los parámetros meteorológicos. Durante el estudio, las concentraciones de BTEX no mostraron un patrón diurno definido, lo que implica una distribución uniforme a lo largo del día. Se confirmó esta observación mediante pruebas estadísticas como Levene y Bartlett. Se observaron concentraciones más altas de etilbenceno ($3.530 \mu g m^{-3}$) en comparación con el tolueno ($2.860 \mu g m^{-3}$), mientras que $PM_{2.5}$ y NO_2 alcanzaron picos durante la tarde, coincidiendo con el aumento del tráfico vehicular. Las correlaciones positivas entre los BTEX sugieren un origen común. El análisis multivariado reveló asociaciones entre benceno, tolueno y $PM_{2.5}$, posiblemente debido a emisiones vehiculares, y se identificó una relación entre la temperatura, la radiación solar, el xileno y el etilbenceno, indicando una posible contribución de emisiones evaporativas y fotoquímicas. Los vientos predominantes del sureste transportaron contaminantes de fuentes como el tráfico vehicular, establecimientos educativos y hoteleros. La influencia de sistemas de baja presión contribuyó a dispersar los contaminantes, resultando en bajos niveles de BTEX en el aire, como se confirmó mediante comparaciones con otras ubicaciones. Las fuentes locales y recientes de emisiones vehiculares al parecer fueron la principal influencia en las concentraciones de BTEX en el sitio de estudio.

Palabras clave: BTEX, variación diurna, contaminantes criterio, Campeche, México.

Abstract

In Mexico, there is limited information on controlling and preventing air pollution, and air quality regulations are lacking. This study seeks to measure the levels of benzene, toluene, p-xylenes, and ethylbenzene in the air in Ciudad del Carmen, Campeche, and analyze their relationship with $PM_{2.5}$ and NO_2 , as well as the impact of meteorological factors. During the study, it was found that BTEX concentrations did not follow a specific daily pattern, indicating an even distribution throughout the day. This was confirmed by statistical tests such as Levene and Bartlett. Ethylbenzene showed higher concentrations ($3,530 \mu g m^{-3}$) compared to toluene ($2,860 \mu g m^{-3}$), while $PM_{2.5}$ and NO_2 peaked in the afternoon, aligning with increased vehicular traffic. Positive correlations between the BTEXs suggest a common source. Multivariate analysis indicated connections between benzene, toluene, and $PM_{2.5}$, likely due to vehicle emissions, and a link was identified between temperature, solar radiation, xylene, and ethylbenzene, suggesting a possible contribution from evaporation and photochemical emissions. Predominant south-southeast winds carried pollutants from sources such as vehicular traffic, schools, and hotels. The influence of low-pressure systems helped disperse pollutants, resulting in low BTEX levels in the air, as confirmed by comparisons with other locations. Local and recent vehicle emissions appeared to be the primary influence on BTEX concentrations at the study site.

Keywords: BTEX, diurnal variation, criteria pollutants, Campeche, Mexico.

Introducción

La calidad del aire es esencial para la salud humana y el medio ambiente. Sin embargo, la contaminación del aire es un problema global que afecta a la calidad de vida de las personas en todo el mundo (Hong *et al.*, 2006). Uno de los contaminantes del aire más preocupantes son los compuestos orgánicos volátiles (COV), existiendo dentro de ellos, un subgrupo de compuestos denominados BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno). Los BTEX son compuestos químicos que se encuentran en el aire debido a la actividad industrial, la quema de combustibles fósiles y otras fuentes antropogénicas. Estos compuestos pueden tener efectos negativos en la salud humana y en el medio ambiente, por lo que se han llevado a cabo numerosos estudios para evaluar su magnitud y sus efectos. (Ahn, 2014). Los BTEX son un grupo de compuestos químicos que se encuentran en el aire debido a diversas actividades antropogénicas. El benceno, el tolueno, el etilbenceno y los xilenos (orto, meta y para) se liberan al aire principalmente a través de la combustión de combustibles fósiles, como la gasolina y el diésel, y la emisión industrial de productos químicos. (Wu *et al.*, 2012). El tráfico vehicular es una fuente importante de emisión de BTEX, en las áreas urbanas, los automóviles, camiones y motocicletas emiten BTEX durante la combustión de combustibles fósiles. La industria también es otra fuente importante de emisión de BTEX. Las refinerías de petróleo y las plantas químicas liberan BTEX al aire durante la producción de productos químicos y la refinación de petróleo. Además, la eliminación inadecuada de productos químicos y la

liberación accidental de sustancias químicas durante el transporte y el almacenamiento también pueden ser fuentes importantes de emisión de BTEX. (Pérez *et al.*, 2014)

Los BTEX pueden distribuirse por el aire y dispersarse a través del viento. Sin embargo, la distribución y dispersión de BTEX depende de varios factores, como las condiciones meteorológicas, la topografía del terreno y las fuentes emisoras. En las áreas urbanas, los niveles de BTEX suelen ser más altos en las zonas de mayor tráfico vehicular y en las áreas industriales. En las áreas rurales, los niveles de BTEX suelen ser más bajos, pero aún pueden ser significativos debido a la presencia de carreteras y otras fuentes de emisión. (Allahabady *et al.*, 2022). Los efectos de los BTEX en la salud humana constituyen una preocupación importante. El benceno es un carcinógeno conocido y ha sido relacionado con enfermedades como la leucemia (Hong *et al.*, 2006). El tolueno, por su parte, puede causar irritación de los ojos, la nariz y la garganta, mientras que los xilenos pueden afectar el sistema nervioso central y causar síntomas como mareo, dolor de cabeza y náuseas. El etilbenceno también se ha relacionado con problemas de salud, como irritación de la piel y los ojos. (Sánchez & Alcantar, 2007).

Además de los BTEX, existen muchos otros contaminantes del aire que pueden ser perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente. Estos incluyen partículas finas, óxidos de nitrógeno, ozono, dióxido de azufre y monóxido de carbono, entre otros. Todos estos contaminantes tienen efectos negativos en la salud y pueden provocar

problemas respiratorios, enfermedades cardiovasculares y otros problemas de salud. Para combatir los efectos de los contaminantes del aire, se han implementado varias políticas y programas en todo el mundo. Por ejemplo, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) ha establecido estándares de calidad del aire para el benceno y otros contaminantes del aire. Dicha Agencia, ha establecido un nivel máximo de contaminante (MCL) para el benceno de 5 partes por mil millones (5 ppb) en el agua potable. La EPA estima que la exposición de por vida a una concentración de 10 ppb de benceno en el agua potable o a 0.4 ppb en el aire podría causar un caso adicional de cáncer por cada 100 000 personas expuestas. La EPA recomienda que los niños no se expongan a más de 200 ppb de benceno en el agua potable durante períodos breves (10 días o menos) (ATSDR, 2024). La Unión Europea en la Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo establece los límites para los COV. Uno de los principales límites establecidos en esta directiva es para el Benzo(a)pireno, un compuesto orgánico volátil cancerígeno. El límite para este contaminante es de 1 ng m^{-3} (nanogramos por metro cúbico) de aire ambiente, medido como concentración media anual. Este límite tiene como objetivo proteger la salud pública contra los efectos nocivos del Benzo(a)pireno en la atmósfera. (Europea, 2008). Además, los esfuerzos por reducir la dependencia de los combustibles

fósiles y promover la energía renovable también pueden tener un impacto significativo en la calidad del aire. (Sanchez & Alcantar, 2007). A pesar de su toxicidad y efectos a la salud, en México no existe una regulación en aire ambiente para estos compuestos. Por lo anterior, es importante contar con información que permita conocer los niveles y distribución de estos compuestos en el aire para poder implementar en un futuro una norma que controle las concentraciones de BTEX en aire ambiente.

En México, los BTEX son un grupo de contaminantes que no han sido estudiados a profundidad de manera especializada, lo que ha resultado en la falta de una normatividad que regule su presencia, a diferencia de otros contaminantes. La única red de monitoreo atmosférico que mide BTEX se encuentra en la Ciudad de México, esta red de monitoreo puede ser consultada en el portal web SINAICA (inecc.gob.mx). Por lo tanto, la información disponible sobre los niveles de estos compuestos en el aire ambiente de áreas urbanas en México es limitada.

Con respecto a esto último, por tanto, el presente estudio tiene como objetivo, determinar los niveles, origen y variación diurna de los BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos) en aire ambiente en un sitio urbano de Ciudad del Carmen, Campeche, durante la estación de verano de 2022, así como su relación con los contaminantes criterio y parámetros.

Metodología

Muestreo

El muestreo de BTEX se llevó a cabo en la zona de playa norte de Ciudad del Carmen, Campeche. Las muestras fueron recogidas en el área al aire libre del patio de las instalaciones del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICML) de la UNAM campus Ciudad del Carmen. Las muestras se colectaron en períodos diurnos divididos en tres horarios, B1: de 7 a 8 h., B2: de 14:00 a 15:00 h y B3: de 18:00 a 19:00 h, durante la semana del 20 al 24 de junio de 2022. Después de cada periodo de muestreo, las muestras se refrigeraron y procesaron para su desorción y reposo durante al menos 24 horas antes de realizar el análisis por cromatografía. En cuanto a la selección y descripción del sitio de estudio, se consideraron los siguientes factores:

Actividades Humanas:

La zona de playa norte de Ciudad del Carmen es un área urbana densamente poblada con puntos clave como preparatorias, un casino, empresas y embarcaciones dedicadas a la pesca y la extracción de hidrocarburos. Estas actividades generan emisiones significativas de BTEX al aire.

Meteorología:

La zona playa norte se caracteriza por un clima cálido y húmedo, condiciones que pueden facilitar la dispersión de los BTEX en el aire. (Moreira, 2021).

Demografía:

Con una población de alrededor de 248 845 habitantes, la densidad poblacional de Ciudad del Carmen puede contribuir a la exposición de la población a los BTEX. (INEGI, 2020).

Fisiografía:

La zona playa norte se encuentra en una planicie costera, lo que puede facilitar el transporte de los BTEX desde las fuentes de emisión hasta el sitio de muestreo. (Moreira, 2021).

Considerando estos factores, se eligió el sitio de muestreo ubicado en las coordenadas (18.657618576509485 N, -91.84220654447019 O), aproximadamente a 1 km del puerto pesquero y a 2 km de la zona centro de la ciudad, como se muestra en la figura 1.

El muestreo BTEX en aire ambiente se llevó a cabo utilizando tubos de vidrio de la marca Anasorb CSC 226-01 (figura 2). Estos tubos presentan dimensiones de 7x6 mm y están divididos en dos secciones, cada una conteniendo 50 mg y 100 mg de carbón activado producido a base de coco. Para realizar este proceso, se empleó una bomba de vacío de la marca SKC, modelo 224-52 (figura 2), operando con un flujo controlado de 1.5 L min⁻¹.

Una vez finalizado cada muestreo, se sellaron ambos extremos del tubo que contenía la muestra de aire. Estos tubos se guardaron en hieleras para mantenerlos refrigerados durante el traslado, garantizando su conservación en óptimas condiciones. Posteriormente, se llevó a cabo la desorción y el almacenamiento a bajas temperaturas para su análisis futuro. Este método permitió obtener datos precisos y confiables para evaluar la calidad del aire en el área de estudio.

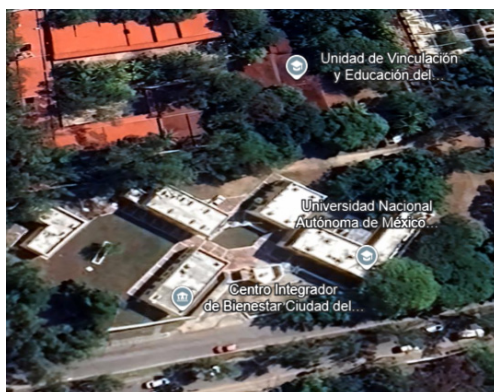


Figura 1. IMCL UNAM campus Ciudad del Carmen.



Figura 2. Tubos SKC Anasorb CSC 226-0 y Bomba SKC modelo 224-52 44XR.

Análisis de BTEX

Después de que las muestras fueron recolectadas en el campo, se llevó a cabo la desorción de los tubos utilizando disulfuro de carbono (CS_2) en viales de 2 mL de color ámbar. En este proceso, se vertió una sección de cada muestra en un vial previamente etiquetado, al que se añadió 1 mL de CS_2 ,

seguido de un agitado constante durante 5 minutos. Este procedimiento se repitió para cada una de las muestras recolectadas. Una vez completada la preparación de las muestras, se almacenaron en refrigeración para evitar la evaporación. Después de un reposo de 24 horas, se procedió al análisis mediante cromatografía de gases con detector de ioni-

zación de llama (FID), basado en el método “Determinación de hidrocarburos aromáticos (benceno, tolueno, etilbenceno, p-xileno) en aire - Método de adsorción en carbón activo/cromatografía de gases (Métodos de Toma de Muestra y Análisis MTA/MA-030/A92” del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene de España. El cromatógrafo TRACE GC Ultra Gas Chromatographs Thermoscientific, operó en modo splitless, utilizando aire extra seco, gas de hidrógeno de alta pureza y nitrógeno puro como gas acarreador. La columna capilar utilizada fue de 30 m x 0.32 mm ID, de tipo metil de sílica fundida, con un espesor de película de 0.5 µm.

Las concentraciones de BTEX encontradas en este estudio se compararán con los valo-

res de referencia (Mena, 2021) establecidos por la normativa internacional (tabla 1).

Análisis de contaminantes criterio

En el caso de contaminantes criterio (NO_2 y $\text{PM}_{2.5}$), las concentraciones fueron obtenidas del portal web de Windy (<https://www.windy.com>). Los resultados obtenidos fueron empleados para realizar análisis estadísticos y de excedencia, en concordancia con las Normas Oficiales Mexicanas actuales (tabla 2). La tabla 2 proporciona un resumen de los indicadores utilizados para evaluar el cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas (Normativa Vigente Para Contaminantes Criterio, 2023) en relación con cada uno de los contaminantes criterio

Tabla 1. Normativa internacional para los niveles de BTEX permisibles en la atmósfera.

Compuesto	Tipo de exposición	Periodo promedio	Valor límite
Benceno	Ambiental	1 año civil	0.00155 ppm ($4.97 \mu\text{g m}^{-3}$) Reglamento técnico ambiental de calidad del aire (2017).
	Ocupacional	8 horas	1 ppm ($3,188.16 \mu\text{g m}^{-3}$) NIOSH (2005 a).
		Anual	0.00156 ppm ($5 \mu\text{g m}^{-3}$) Reglamento técnico ambiental de calidad del aire (2017).
Tolueno	Ambiental	30 minutos	0.27 ppm ($1,015.42 \mu\text{g m}^{-3}$) WHO (2000).
	Ocupacional	8 horas	100 ppm ($376,081.63 \mu\text{g m}^{-3}$) NIOSH (2005 b).
		No más de 15 minutos	150 ppm ($564,122.44 \mu\text{g m}^{-3}$) NIOSH (2005 b).
		1 semana	0.0691 ppm ($260 \mu\text{g m}^{-3}$) NIOSH (2005 b).
		30 minutos	0.2658 ppm ($1,000 \mu\text{g m}^{-3}$) NIOSH (2005 b).
Etilbenceno	Ocupacional	8 horas	100 ppm ($433,346.93 \mu\text{g m}^{-3}$) NIOSH (2005 c).
Xilenos	Ocupacional	8 horas	100 ppm ($433,306.12 \mu\text{g m}^{-3}$) NIOSH (2005 d).
		Anual	0.2007 ppm ($870 \mu\text{g m}^{-3}$) Reglamento técnico ambiental de calidad del aire (2017).

Tabla 2. Normativa vigente para contaminantes criterio.		
Contaminante	Norma Oficial Mexicana	Descripción
Dióxido de azufre (SO2)	NOM-022-SSA1-2019	0.04 ppm (promedio de 24 h)
Monóxido de carbono (CO)	NOM-021-SSA1-2021	11 ppm (promedio móvil de 8 h)
Dióxido de nitrógeno (NO2)	NOM-023-SSA1-2021	0.106 ppm (promedio horario)
Ozono (O3)	NOM-020-SSA1-2021	0.065 ppm (promedio móvil de 8 h)
Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM2.5)	NOM-025-SSA1-2021	41 µg m ⁻³ (promedio de 24 h)
Monóxido de nitrógeno (NO)	-----	-----

(Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios, 2017).

Análisis meteorológico

La información relativa a los parámetros meteorológicos se obtuvo a partir de los datos suministrados por Windy (<https://www.windy.com>). Se obtuvieron rosas de viento de la región utilizando el software WRPLOT-VIEW de la NOAA (<https://www.weblakes.com/software/freeware/wrplot-view/>). Adicionalmente, con el objetivo de evaluar la influencia regional de los vientos, se calcularon las trayectorias de las masas de aire mediante la herramienta HYSPLIT de la NOAA.

Análisis estadístico

La exploración de la relación entre los BTEX, los contaminantes criterio y los parámetros meteorológicos se realizó mediante un análisis estadístico utilizando el complemento para Excel, XLSTAT (<https://www.xlstat.com/es/>). Este software facilitó la ejecución de análisis multivariados de componentes principales (ACP), análisis bivariados de correlaciones de Pearson y análisis de cargas factoriales.

Resultados

Comportamiento diurno de las concentraciones de los BTEX

En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos en los tres periodos de muestreo B1, B2, B3, para benceno, tolueno, etilbenceno y xileno, así como sus concentraciones promedio:

La tabla 3 revela patrones interesantes en las concentraciones promedio de los compuestos BTEX a lo largo del día. Aun cuando las concentraciones fueron mayores para

benceno y tolueno, así como de etilbenceno y xileno, durante el horario B2, que abarca la tarde, específicamente entre las 14:00 y las 15:00 h, estas diferencias no fueron significativas, indicando que estos compuestos estuvieron homogéneamente distribuidos en el sitio de estudio a lo largo del día. Este hallazgo sugiere que la intensidad de las fuentes fue la misma a lo largo del día, considerando la influencia de actividades diurnas en la liberación de estos compuestos, como el

Tabla 3. Concentraciones de BTEX en $\mu\text{g m}^{-3}$.				
	Benceno	Tolueno	Etilbenceno	Xileno
B1	3.312	2.888	3.511	3.453
	3.112	2.793	3.485	3.374
	3.293	2.960	3.515	3.417
	3.127	2.810	3.516	3.414
	3.148	2.928	3.496	3.387
B2	3.134	2.811	3.558	3.441
	3.215	2.937	3.544	3.435
	3.194	2.776	3.529	3.417
	3.394	3.071	3.587	3.522
	3.146	2.897	3.558	3.446
B3	3.046	2.770	3.531	3.410
	3.552	2.860	3.519	3.410
	3.187	2.894	3.546	3.472
	3.020	2.757	3.541	3.417
	3.165	2.743	3.522	3.403
Promedios	3.203	2.860	3.530	3.428

tráfico vehicular o las actividades industriales en la zona de estudio.

Por otro lado, las concentraciones más bajas de benceno y tolueno se observaron en el horario B3, que comprende entre las 18:00 y las 19:00 horas, sin embargo, esta diferencia no fue significativa. Este fenómeno podría estar relacionado con una disminución en la actividad industrial o una menor circulación vehicular al final del día, lo que resulta en una menor emisión de estos compuestos. Aplicando las pruebas estadísticas de Levene y de Bartlett para identificar si existieron diferencias significativas en las concentraciones de BTEX en los diferentes periodos de muestreo (B1, B2 y B3); se encontró que no hubo diferencias significativas en las concentraciones entre los periodos de muestreo, sugiriendo que estos compuestos se encuentran homogéneamente distribuidos en

el sitio de muestreo y que no presentan un comportamiento diurno.

Comparación de resultados con estudios realizados a nivel nacional e internacional

En la tabla 4 se presentan concentraciones de BTEX en diferentes sitios del mundo y en algunos otros lugares de México. Se puede observar que, las concentraciones más altas de benceno se encuentran en Delhi, India, y en Nuevo León¹, México, mientras que las concentraciones más bajas se observan en Campeche⁸, México, y Sari, Irán. Tolueno muestra una amplia gama de concentraciones, con valores más altos en Delhi, India, y valores más bajos en Campeche⁸, México.

Las concentraciones de etilbenceno varían considerablemente, con valores más altos en Delhi, India, y valores más bajos en Cam-

Tabla 4. Comparativa de niveles de BTEX (µg m-3) a nivel nacional e internacional.							
Lugar	Referencia	Benceno	Tolueno	Etilbenceno	Xileno	o-Xileno	m-Xileno
Delhi India	(Singh <i>et al.</i> , 2015).	26.200 ± 11.900	92.70 ± 43.700	20.60 ± 10.200	----	24.50 ± 15.600	12.90 ± 7.900
Shiraz Iran	(Dehghani <i>et al.</i> , 2018)	26.15 ± 17.650	12.97 ± 7.120	7.50 ± 2.500	----	19.34 ± 6.490	23.38 ± 8.280
Qom Iran	(Mojarrad <i>et al.</i> , 2019)	12.38 ± 15.560	15.20 ± 19.840	5.69 ± 9.490	12.38 ± 15.56	----	----
Kuala Malasia	(Hamid <i>et al.</i> , 2020)	3.86 ± 0.310	27.70 ± 0.970	8.46 ± 0.340	----	13.87 ± 0.360	11.49 ± 0.390
Sari Iran	(Allahabad <i>et al.</i> , 2022)	2.784 ± 1.461	3.495 ± 1.390	2.091 ± 0.811	1.14 ± 0.419	----	----
Nuevo León (1)	(Cerón <i>et al.</i> , 2014)	55.24	22.24	6.94	4.17	----	----
Nuevo León (2)	(Cerón <i>et al.</i> , 2014)	21.079	3.648	2.551	2.115	----	----
Mérida (3)	(Cerón <i>et al.</i> , 2017)	40.91	6.87	6.23	13.87	----	----
Mérida (4)	(Cerón <i>et al.</i> , 2017)	36.86	3.29	4.48	8.29	----	----
León Guanajuato	(Cerón <i>et al.</i> , 2020)	1.73	11.85	11.86	3.31	----	----
Monterrey (5)	(Luna, 2021)	18.651	21.392	19.947	21.414	----	----
Monterrey (6)	(Luna, 2021)	18.727	25.052	20.247	22.868	----	----
Campeche (7)	(Cerón <i>et al.</i> , 2023)	0.979	0.207	0.349	0.339	----	----
Campeche (8)	(Cerón <i>et al.</i> , 2023)	0.336	0.067	0.228	0.348	----	----
Ciudad del Carmen	Este estudio	3.203 ± 0.137	2.860 ± 0.091	3.530 ± 0.026	3.428 ± 0.037	----	----
Nota : 1 Nuevo León época de Verano; 2 Nuevo León época de Otoño; 3 Mérida sitio Cholul; 4 Mérida sitio SEDUMA; 5 Monterrey sitio Santa Catarina; 6 Monterrey sitio Monterrey; 7 Campeche sitio Instituto Tecnológico de Lerma (TNL); 8 Campeche sitio INAH							

peche⁸, México. Finalmente, las concentraciones de xileno también muestran variabilidad, con valores más altos en Shiraz Irán y Monterrey⁶, México, y valores más bajos en Sari, Irán, y Campeche⁷, México.

Variaciones diurnas de las concentraciones de contaminantes criterio y BTEX

3.3.1 PM_{2.5}

En la figura 3 se puede observar que, la concentración promedio más baja fue 11.580 µg m⁻³ y un valor mínimo de 2.560 µg m⁻³

en el horario B1; mientras que la concentración promedio más alta fue de 13.800 µg m⁻³ con un máximo de 19.000 µg m⁻³ en el horario de B3. Existieron diferencias notables en las concentraciones de PM_{2.5} entre los 3 periodos (B1, B2, B3). B3 mostró una tendencia a tener las concentraciones más altas, seguida de B2 y luego B1. La concentración promedio para PM_{2.5} en el estudio fue de 14.440 µg m⁻³. No se observaron valores atípicos en los datos de PM_{2.5}, lo que sugiere que no hubo concentraciones extremadamente altas o bajas que estén muy alejadas de la tendencia general.

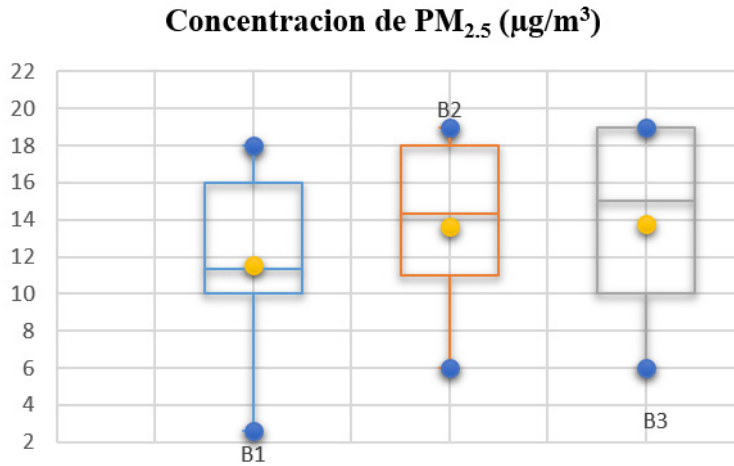


Figura 3. Estadística descriptiva de la concentración de PM_{2.5}.

NO₂

De acuerdo a la figura 4, las concentraciones promedio más altas de NO₂ se observaron durante el periodo de la tarde B3 (0.402 µg m⁻³), con los valores más bajos durante el periodo de la mañana B1 (0.230 µg m⁻³).

Benceno

De acuerdo a la figura 5, las concentraciones promedio para benceno permanecieron constantes a lo largo del día, lo que indica que este compuesto se encuentra distribuido de manera homogénea en el sitio de estudio, sin mostrar un comportamiento diurno.

Tolueno

De acuerdo a la figura 6, para tolueno, las concentraciones promedio más altas se observaron en el periodo del medio día, seguido del periodo de la mañana y mostrando las concentraciones más bajas durante el periodo de la tarde.

Etilbenceno

De acuerdo a la figura 7, Etilbenceno mostró concentraciones promedio más altas durante el periodo del medio día, seguido en orden de importancia por el periodo de la tarde y mostrando las concentraciones promedio más bajas durante la mañana.

Xilenos

A partir de la figura 8, se puede observar que, los xilenos mostraron concentraciones promedio más altas durante el periodo del medio día, seguido en orden de importancia por el periodo de la tarde y mostrando las concentraciones promedio más bajas durante la mañana.

Matriz de Pearson

A partir de la tabla 5 se puede observar que benceno-tolueno y tolueno-xileno mostraron correlaciones significativas positivas entre ellos: 0.559 y 0.641, respectivamente.

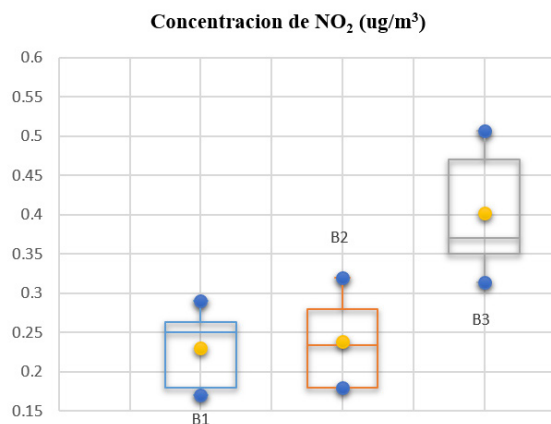


Figura 4. Estadística descriptiva de la concentración de NO₂.

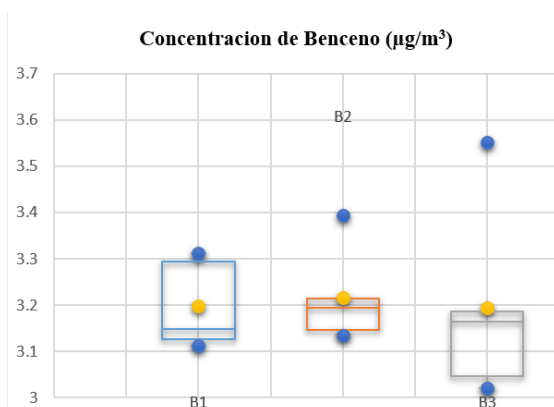


Figura 5. Estadística descriptiva de la concentración de Benceno.

Etilbenceno-xileno presentaron una correlación positiva significativa de 0.828. Lo anterior indica que los BTEX fueron originados a partir de las mismas fuentes. Etilbenceno y Xileno mostraron correlaciones positivas significativas con la temperatura (0.90 y 0.530, respectivamente), indicando que estos compuestos pudieron ser originados a partir de emisiones evaporativas.

Etilbenceno-xileno mostraron también correlaciones positivas significativas con

la radiación solar (0.806 y 0.523), lo que indica que estos compuestos pudieron ser producidos a partir de reacciones fotoquímicas. PM_{2.5} tuvo una correlación positiva con la presión atmosférica, indicando que las concentraciones de PM_{2.5} pudieron ser influenciadas por sistemas de alta presión. Estas correlaciones entre las variables medidas pueden ser observadas en las gráficas de dispersión (scatter plots) y los correlogramas (Figuras 9 y 10).

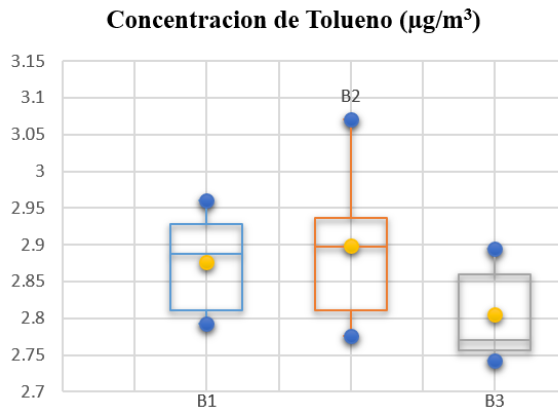


Figura 6. Estadística descriptiva de la concentración de Tolueno.

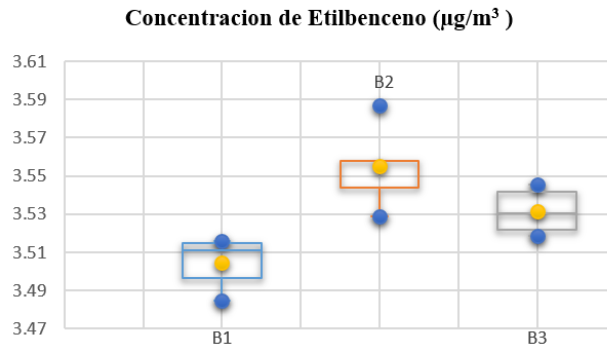


Figura 7. Estadística descriptiva de la concentración de Etilbenceno.

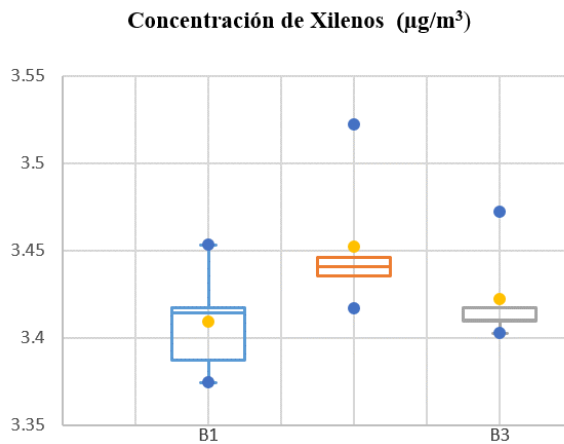


Figura 8. Estadística descriptiva de la concentración de Xilenos.

Tabla 5. Matriz de Pearson del sitio de estudio.

Matriz de correlaciones (Pearson):											
Variables	Benceno	Tolueno	Etilbenceno	Xileno	PM2.5	NO2	Temperatura (°C)	Dirección del viento (grados)	Velocidad km h-1	Radiación Solar (W m-2)	Presión (mm Hg)
Benceno	1	0.559	0.101	0.358	0.146	0.215	-0.116	-0.209	-0.004	-0.015	0.331
Tolueno	0.559	1	0.374	0.641	0.211	-0.290	0.045	-0.227	0.164	0.176	0.223
Etilbenceno	0.101	0.374	1	0.829	0.267	0.114	0.890	0.362	-0.126	0.806	-0.381
Xileno	0.358	0.641	0.829	1	0.221	0.011	0.530	0.087	0.013	0.523	-0.257
PM2.5	0.146	0.211	0.267	0.221	1	-0.010	0.253	-0.046	0.357	0.134	0.517
NO2	0.215	-0.290	0.114	0.011	-0.010	1	0.161	0.182	-0.012	-0.175	-0.430
Temperatura (°C)	-0.116	0.045	0.890	0.530	0.253	0.161	1	0.424	-0.070	0.876	-0.369
Dirección del viento (grados)	-0.209	-0.227	0.362	0.087	-0.046	0.182	0.424	1	-0.407	0.219	-0.551
Velocidad km h-1	-0.004	0.164	-0.126	0.013	0.357	-0.012	-0.070	-0.407	1	-0.157	0.382
Radiación Solar (W m-2)	-0.015	0.176	0.806	0.523	0.134	-0.175	0.876	0.219	-0.157	1	-0.133
Presión (mm Hg)	0.331	0.223	-0.381	-0.257	0.517	-0.430	-0.369	-0.551	0.382	-0.133	1

Los valores en negrita son diferentes de 0 con un nivel de significación $\alpha=0.05$

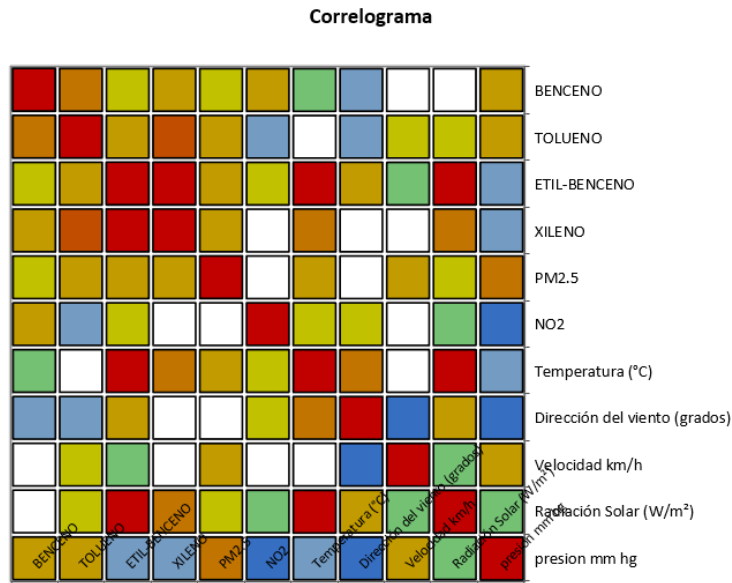


Figura 9. Correlograma de los BTEX del sitio.

Análisis de Componentes Principales (ACP)

Se aplicó un análisis de componentes principales para identificar relaciones entre las diferentes variables medias (Análisis estadístico multivariado). A partir de la figura 11 se puede observar que se requirieron 2 componentes principales (F1 y F2) para explicar el 57.79 % de la variabilidad total de los datos. Benceno, Tolueno y $PM_{2.5}$ mostraron una relación significativa, lo cual indica que pudieron ser originados de la misma fuente, probablemente emisiones vehiculares, puesto que las partículas $PM_{2.5}$ son indicadores de fuentes móviles. Xileno y etilbenceno muestran una relación significativa con radiación solar y temperatura, lo cual indica que estos hidrocarburos estuvieron influenciados por emisiones evaporativas y actividad fotoquí-

mica. NO_2 mostró correlación con la dirección del viento, lo cual permite inferir que este contaminante pudo haber sido transportado por la acción del viento desde otras zonas.

Rosas de Viento

A continuación se presentan las rosas de viento para el sitio de muestreo. El 20 de junio de 2022 se puede observar que el viento dominante fue del sureste con velocidades de viento entre 1 y 4 $m s^{-1}$ (figura 12). En esta dirección se localiza una Avenida con alto tráfico vehicular, en dicha avenida se encuentra un establecimiento de asado y carnes a la parrilla además de encontrarse cerca de un centro educativo, lo que contribuye a que el tráfico vehicular sea muy alto debido a estos dos sitios, también es impor-

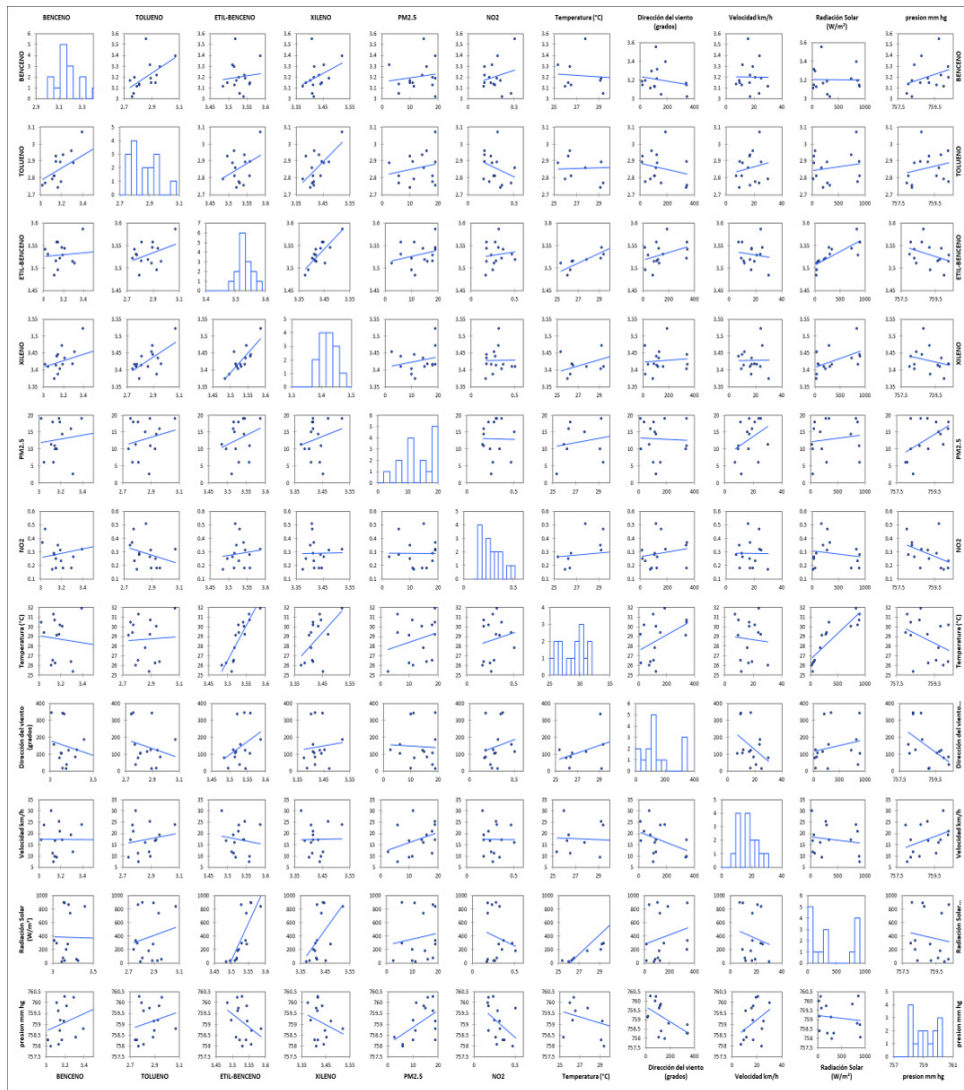


Figura 10. Diagramas de dispersión de los BTEX del sitio.

tante mencionar que un poco más hacia el sur hay una estación de servicio de diésel y gasolina.

El 21 de junio de 2022 (figura 13), los vientos dominantes soplaron desde el Este con velocidades de viento entre 1 y 11 m s⁻¹. En esta dirección se localiza una avenida con alto tráfico vehicular (Av. Juárez) ya que en

esta avenida se encuentran hoteles muy concurridos, además, en esta zona se encuentran diversos centros educativos lo cual contribuye a que sea una zona muy transitada y con alto tráfico vehicular.

El día 22 de junio de 2022, los vientos dominantes soplaron desde el E y ESE con velocidades de viento entre 4 y 7 m s⁻¹ (Figura

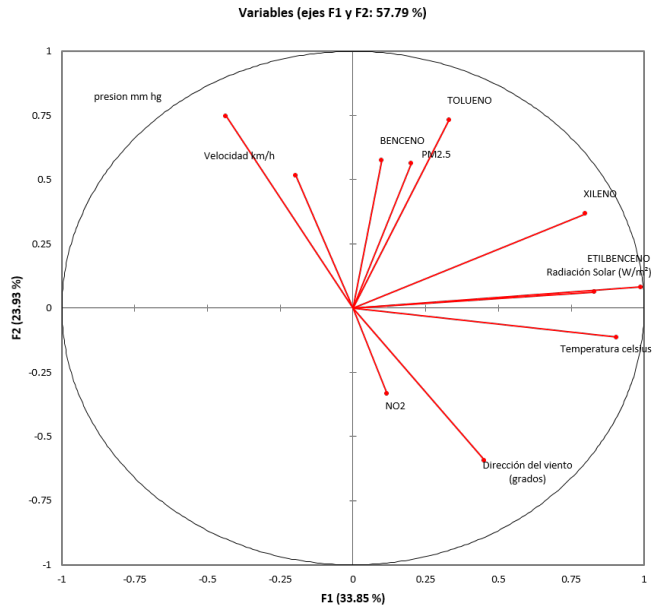


Figura 11. Análisis de Componentes Principales de BTEX.

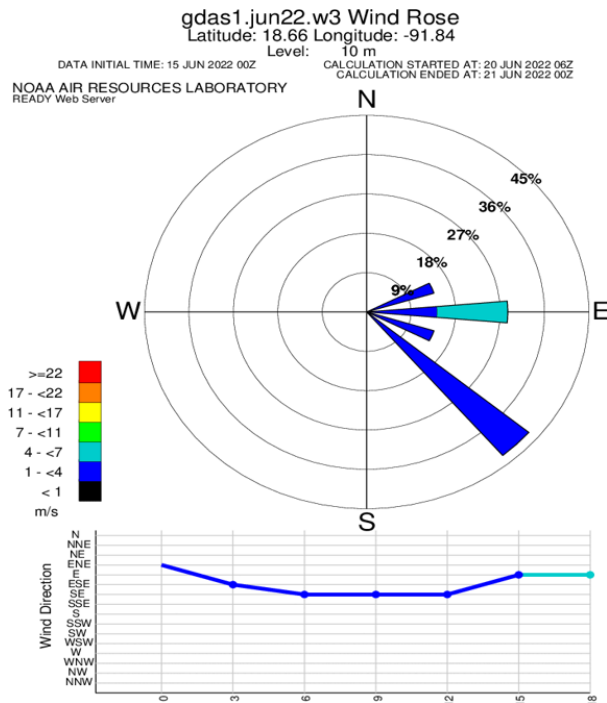


Figura 12. Rosa de viento del día 20 de junio del 2022 de 6:00-24:00 h.

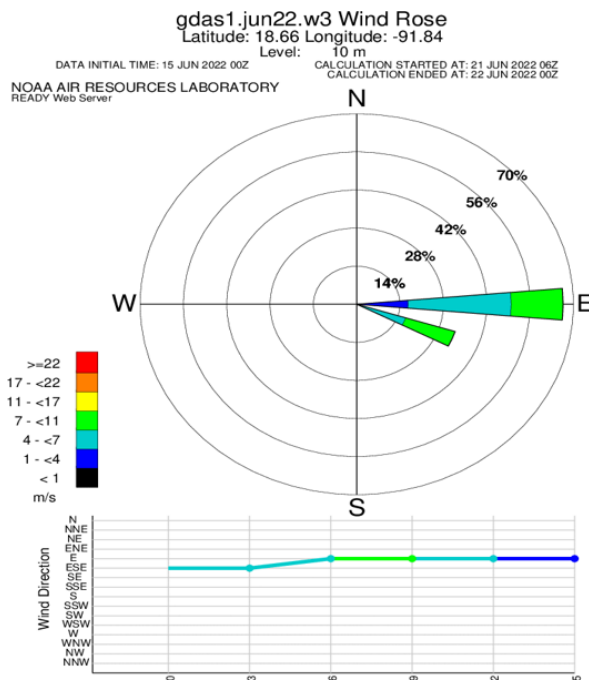


Figura 13. Rosa de viento del día 22 de junio del 2022 de 6:00-24:00 h.

14). En esta dirección se localiza la Avenida con alto tráfico vehicular (Av. Juárez) ya que en esta avenida se encuentran hoteles muy concurridos, además, en esta zona se encuentran diversos centros educativos y en la parte ESE se encuentra un mercado, así como diversas empresas del sector energético y una empresa metal mecánica.

Mientras que el 23 de junio de 2022 (figura 15), los vientos soplaron predominante del NE con velocidades de viento entre 1 y 4 m s⁻¹. En esta localización geográfica se encuentran varios campos deportivos, estaciones de autobuses, el malecón costero, con afluencia de tránsito vehicular en algunas horas del día. Estas fuentes pudieron haber contribuido a los niveles de BTEX en el sitio de estudio.

Para el día 24 de junio de 2022 (figura 16), los vientos soplaron predominante del norte y NE con velocidades de viento entre 1 y 4 m s⁻¹. En esta localización geográfica se encuentra varios campos deportivos, estaciones de autobuses, el malecón costero y la playa que es visitada comúnmente ya que es usada como zona turística. Todas estas zonas son muy concurridas por lo que contribuyen al alto tráfico vehicular.

Influencia de los Sistemas de alta y baja presión sobre el sitio de muestreo

Se realizaron los mapas de presión del sitio de muestreo, mediante la herramienta READY de ARL NOAA (<https://www.ready.noaa.gov/index.php>) usando las opciones 2D

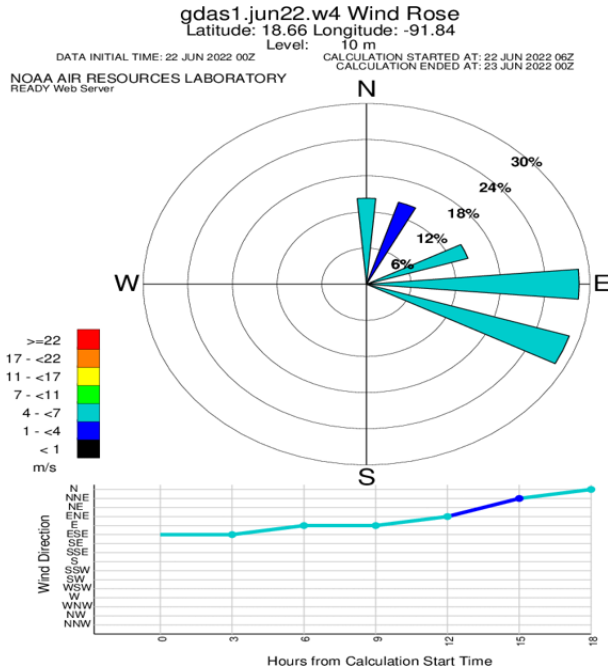


Figura 14. Rosa de viento del día 22 de junio del 2022 de 6:00-24:00 h.

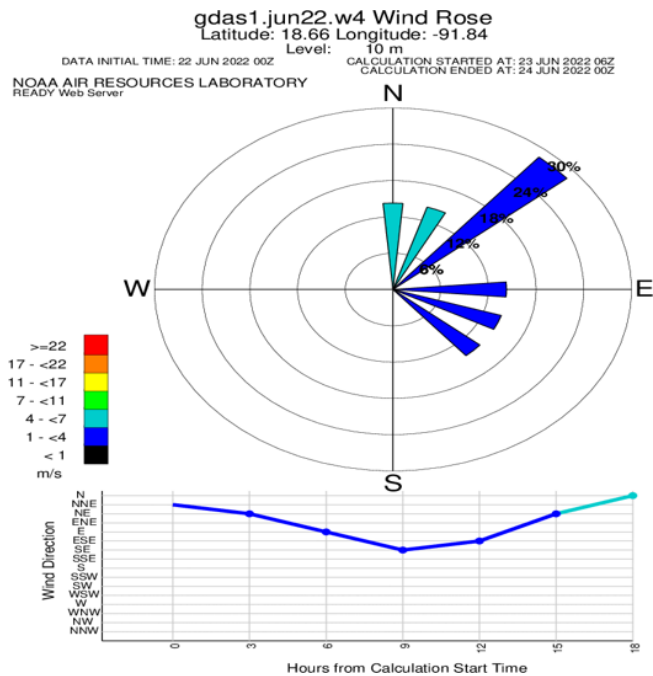


Figura 15. Rosa de viento del día 23 de junio del 2022 de 6:00-24:00 h.

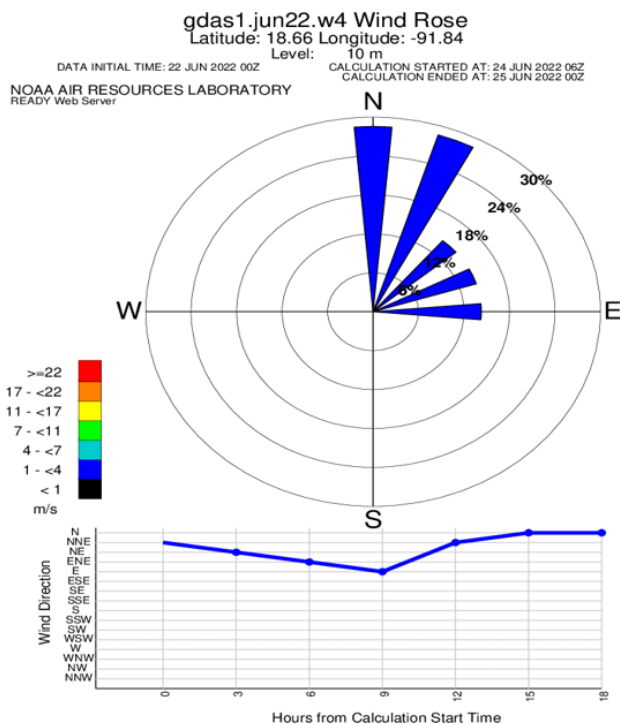


Figura 16. Rosa de viento del día 24 de junio del 2022 de 6:00-24:00 h.

MAP (NCAR GRAPHICS) Y 2D MAP (PSPLOT). Teniendo en cuenta que solo se puede registrar el sistema de presión cada 3 horas, se realizó un mapa de presión por cada horario (mañana, tarde, noche. Estas sesiones se distribuyeron en la mañana (de 7:00 a 8:00 h), medio día (de 14:00 a 15:00 h) y tarde (de 18:00 a 19:00 h), con una duración de 1 hora por muestreo. A lo largo de todo el periodo de muestreo se presentaron sistemas de baja presión que favorecieron la dispersión de los compuestos BTEX en el sitio de muestreo. En la figura 17 se presenta un mapa que podría considerarse como típico de dichas condiciones que prevalecieron durante el periodo de muestreo, en donde se observa que ocurrieron dos sistemas de baja presión.

Razones de BTEX Tolueno/Benceno

Las razones entre los BTEX son una herramienta útil para determinar el probable origen de los BTEX en un sitio dado de acuerdo a su abundancia relativa. Así la razón tolueno/benceno con valores menores a 2-3 son característicos de sitios con una alta influencia de emisiones vehiculares, indicando que los BTEX son originados de emisiones de vehículos a motor (Elbir *et al.*, 2006). Lo anterior debido a que tanto tolueno como benceno son constituyentes de gasolinas. A partir de la tabla 6 se puede observar que, los valores de la razón tolueno/benceno en el sitio de estudio fueron menores a 2, lo cual indica que las concentraciones de BTEX estuvieron

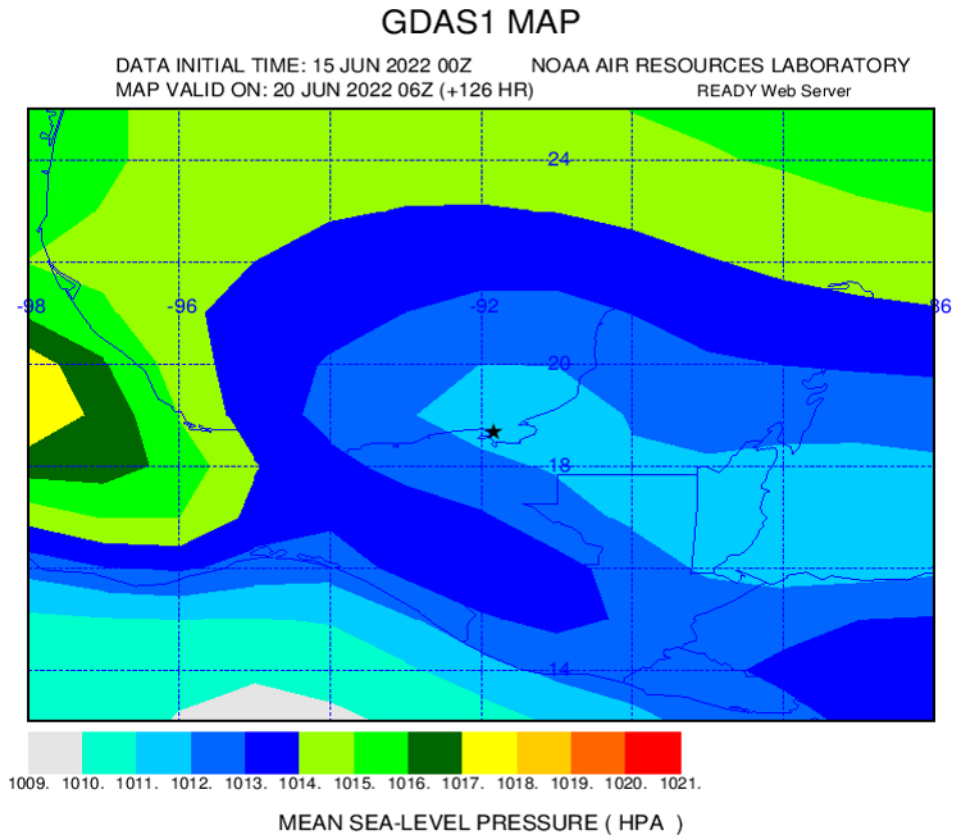


Figura 17. Mapa de presión del día 20 de junio del 2022 12:00 h.

Tabla 6. Razones T/B.			
	B1	B2	B3
20/06/2022	0.872	0.897	0.909
21/06/2022	0.897	0.914	0.805
22/06/2022	0.899	0.869	0.908
23/06/2022	0.899	0.905	0.913
24/06/2022	0.930	0.921	0.867

fuertemente influenciadas por emisiones vehiculares.

Xileno/Etilbenceno

En el caso de la razón xileno/etilbenceno, se usa para inferir la edad de las masas de aire, es decir si las emisiones son de tipo local y frescas o bien son provenientes de masas añejas con un alto procesamiento fotoquímico. Valores por debajo de 4.4 en esta razón in-

dican que las masas de aire son frescas y de tipo local, emisiones recientes (Keymeulen *et al.*, 2001). A partir de la tabla 7 se puede observar que, los valores encontrados de las razones xileno/etilbenceno fueron menores a 4, lo cual indica que las masas de aire conteniendo a los contaminantes en el sitio de estudio son de tipo local y recientes, probablemente asociadas a emisiones de vehículos a gasolina.

Tabla 7. Razones de BTEX X/E.			
	B1	B2	B3
20/06/2022	0.983	0.967	0.966
21/06/2022	0.968	0.969	0.969
22/06/2022	0.972	0.968	0.979
23/06/2022	0.971	0.982	0.965
24/06/2022	0.969	0.969	0.966

Conclusiones

Las concentraciones de BTEX no mostraron un patrón diurno claro, es decir, no hubo diferencias significativas en los diferentes horarios de muestreo. Esto significa que los BTEX estuvieron homogéneamente distribuidos en el sitio de estudio a lo largo del día, y que la intensidad de las fuentes de emisión fue la misma durante los 3 periodos diurnos de muestreo. Las mayores concentraciones promedio fueron observadas para etilbenceno (3.530 µg m⁻³), mientras que tolueno mostro el menor valor promedio de concentraciones (2.860 µg m⁻³). En el caso de PM_{2.5} y NO₂ estos contaminantes mostraron mayores concentraciones durante el periodo de la tarde (19.000 y 0.402 µg m⁻³ respectivamente), lo cual coincide con el pico de

tráfico vehicular asociado a la movilidad de la población.

A partir del análisis bivariado se encontraron correlaciones positivas significativas entre todos los BTEX, indicando que pudieron ser originados de fuentes en común. Etilbenceno y Xileno mostraron correlaciones significativas positivas con la temperatura y la radiación solar por lo que es posible inferir que estos compuestos pudieron ser originados a partir de emisiones evaporativas y reacciones fotoquímicas.

El análisis multivariado (ACP) reveló que, benceno, tolueno y PM_{2.5} mostraron una asociación importante entre sí, indicando que tuvieron un origen en común, probablemente emisiones vehiculares. El ACP re-

velo también una correlación significativa entre temperatura, radiación solar, xileno y etilbenceno, indicando que estos BTEX pudieron ser originados por emisiones evaporativas y actividad fotoquímica. Los vientos dominantes en el sitio de estudio durante el periodo de muestreo soplaron desde el sureste, en esta dirección se localiza una avenida con alto tráfico vehicular (avenida Juárez), diversos centros educativos, empresas del sector energético y hoteles concurridos, todas estas fuentes pudieron haber contribuido a los niveles de BTEX medidos. Du-

rante el periodo de estudio el sitio de muestreo estuvo bajo la influencia de sistemas de baja presión, contribuyendo a la dispersión de los contaminantes, dando como resultado bajos niveles de BTEX en el aire, lo cual se constató al comparar con otros lugares en México y alrededor del mundo. Las razones de BTEX revelaron que las concentraciones de estos compuestos estuvieron influenciadas por emisiones vehiculares y que tuvieron su origen, emisiones de tipo local y recientes normalmente asociadas a emisiones de vehículos de motor a gasolina.

Literatura citada

- ATSDR. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR). https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs3.html consultado el 10 de abril de 2024.
- Ahn, K. (2014). The role of air pollutants in atopic dermatitis. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 993-999.
- Allahabady, A., Yousefi, Z., Tahamtan, R. A. M., & Sharif, Z. P. (2022). Measurement of BTEX (benzene, toluene, ethylbenzene and xylene) concentration at gas stations. *Environmental health engineering and management*, 9 (1), 23-31.
- Ángeles, J., & Magaña, M. (2013). Exposición personal a carbonilos (aldehídos), CO, BTEX y PM2.5 en microambientes de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). SEMARNAT.
- Cerón, J. G., Cerón, R. M., Guarnaccia, C., Lara Severino, R., Marrón, M. R., Guzmán, A. R., Uc, M. P., Angel, G. H., & Rejon, Y. A. S. (2018). Characterization and sources of Aromatic hydrocarbons (BTEX) in an urban site of Tijuana, Baja California, Mexico. AIP Conference Proceedings.
- Cerón, J. G., Cerón, R. M., Ucan, F. V., Baeza, C. B., Fuentes, & M. D. (2017). Characterization and Sources of Aromatic Hydrocarbons (BTEX) in the Atmosphere of Two Urban Sites Located in Yucatan Peninsula in Mexico. *Atmosphere*, 8, 1-23.
- Cerón, J. G., Vargas Canto, M. G., Cerón, R. M., & Uc Chi, M. P. (2023). Concentraciones de BTEX atmosféricos en dos sitios urbanos de Campeche. *Journal of Basic Sciences*, 9 (25), 44-58.
- Cerón, J. C., Cerón, R.M., Martínez, S., Kahl, J., Guarnaccia, C., Lara, R., Rangel, M., & Licona, G. (2020). Health Risk Assessment of the Levels of BTEX in Ambient Air of One Urban Site Located in Leon, Guanajuato, Mexico during Two Climatic Seasons. *Atmosphere*, 11(2), 165.
- Cerón, J., Cerón, R., Kahl, J., Ramírez, E., Guarnaccia, C., Aguilar, C., & López, U. (2014). Diurnal and seasonal variation of BTEX in the air of Monterrey, Mexico: preliminary study of sources and photochemical ozone pollution. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 8, 469-482.

- Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios. (2017). Gobierno de México. Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de Calidad del Aire Ambiente. <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/4-normas-oficiales-mexicanas-nom-de-calidad-del-aire-ambiente>, <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/2-clasificacion-de-los-contaminantes-del-aire-ambiente> consultado el 31 de diciembre de 2017.
- Dehghani, M., Fazlzadeh, M., Sorooshian, A., Tabatabaee, H. R., Miri, M., Baghani, A. N., Delikhoon, M., Mahvi, A. H., & Rashidi, M. (2018). Characteristics and health effects of BTEX in a hot spot for urban pollution. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 155, 133–143.
- Directiva Europea de Calidad del Aire. (2010). Valor límite exigible a partir del 1 de enero del 2010. (2000/69/CE) RD 1073/2002 (España).
- Elbir, T., Çetin, B., Cetin, E., Bayram, A., & Odabaşı, M. (2006). Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) and Their Sources in the Air of Izmir, Turkey. *Environmental Monitoring And Assessment*, 133(1-3), 149-160.
- Europea. (2008). Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de mayo de 2008, relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa. Croatian.
- Hamid, H. H. A., Latif, M. T., Uning, R., Ndzir, M. S. M., Khan, F., Ta, G. C., & Kannan, N. (2020). Observations of BTEX in the ambient air of Kuala Lumpur by passive sampling. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192 (6), 342.
- Hong, Y., Jeng, H. A., Gau, Y., Lin, C., & Lee, I. (2006). Distribution of volatile organic compounds in ambient air of Kaohsiung, Taiwan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 119 (1-3), 43-56.
- INEGI. (2020). México en cifras. Instituto Nacional de Estadística geografía e Informática. <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=070000040003#collapse-Resumen>
- Keymeulen, R. (2001). Benzene, toluene, ethyl benzene and xylenes in ambient air and *Pinus sylvestris* L. needles: a comparative study between Belgium, Hungary and Latvia. *Atmospheric Environment*, 35 (36), 6327-6335.
- Luna, K. L. (2021). Niveles de hidrocarburos aromáticos y su riesgo a la salud en dos sitios urbanos del área metropolitana de monterrey durante época de secas 2021 [Tesis]. Universidad autónoma del Carmen.
- Mena, K. G. (2021). Niveles de hidrocarburos aromáticos y su riesgo a la salud en dos sitios urbanos del área metropolitana de Monterrey durante época de secas 2021. [Tesis]. Universidad Autónoma del Carmen.
- Mojarrad, H., Fard, R. F., Rezaali, M., Heidari, H., Izanloo, H., Mohammadbeigi, A., Mohammadi, A. H., & Sorooshian, A. (2019). Spatial trends, health risk assessment and ozone formation potential linked to BTEX. *Human and Ecological Risk Assessment*, 26 (10), 2836-2857.
- Moreira, A. (2021). Clima de Ciudad del Carmen. Climate Data.
- NIOSH (2005 a). Niveles de Exposición Recomendados por National Institute for Occupational and Safety Health (NIOSH). Pocket Guide to Chemical Hazards. Benzene.
- NIOSH (2005 b). Niveles de Exposición Recomendados por National Institute for Occupational and Safety Health (NIOSH). Pocket Guide to Chemical Hazards. Toluene.
- NIOSH (2005 c). Niveles de Exposición Recomendados por National Institute for Occupational and Safety Health (NIOSH). Pocket Guide to Chemical Hazards. Ethylbenzene.
- NIOSH (2005 d). Niveles de Exposición Recomendados por National Institute for Occupational and Safety Health (NIOSH). Pocket Guide to Chemical Hazards. Xylenes.
- Normativa vigente para contaminantes criterio. (2023). Diario Oficial de la Federación.

- https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5685417&fecha=12/04/2023#gsc.tab=0
- Pérez-Martínez, P. J., De Miranda, R. M., Nogueira, T., Guardani, M. L. G., Fornaro, A., Ynoue, R. Y., & De Fátima Andrade, M. (2014). Emission factors of air pollutants from vehicles measured inside road tunnels in São Paulo: case study comparison. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11(8), 2155-2168.
- Reglamento técnico ambiental de calidad del aire. (2017). Santo Domingo, R.D. Agosto, 2017. Capítulo II.
- Sanchez Montero, J., & Alcantar León, A. (2007). Compuestos Orgánicos volátiles en el medio ambiente. *Monografías de la Real academia Nacional de Farmacia*. 26 (12), 386. España. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera>
- Singh, D., Kumar, A., Pratap, B., Anadam, K., Singh, M., Mina, U., & et.al. (2015). Spatial and temporal variability of VOCs and its source estimation during rush/non-rush hours in ambient air of Delhi, India. *Air Qual Atmos Health*, 9, 483-493.
- WHO. (2000). World Health Organization. Air Quality guidelines for Europe. WHO Regional Publications, European Series No. 23, 2 editions, Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.
- Wu, X., Fan, Z., Zhu, X., Jung, K., Ohman-Strickland, P., Weisel, C., & Liou, P. (2012). Exposures to volatile organic compounds (VOCs) and associated health risks of socio-economically disadvantaged population in a “hot spot” in Camden, New Jersey. *Atmospheric Environment*, 57, 72-79.

