

Cerón-Bretón, R.M., Pérez-Vera, J.I., Martínez-Ortega, M., Cruz-García, Á. O. 2025. EDeterminación del Nivel de Riesgo Asociado a la Inhalación de BTEX en un Sitio Urbano Influenciado por Emisiones de una Estación de Servicio en Ciudad del Carmen, Campeche Durante la Temporada de Secas , p. 123-156. 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. p. ISBN 978-607-8907-33-5. doi 10.26359/EPOMEX01202505.

Determinación del Nivel de Riesgo Asociado a la Inhalación de BTEX en un Sitio Urbano Influenciado por Emisiones de una Estación de Servicio en Ciudad del Carmen, Campeche Durante la Temporada de Secas

*R. M. Cerón-Bretón, J. I. Pérez-Vera,
M. Martínez-Ortega, Á. O. Cruz-García*

Facultad de Química
Universidad Autónoma del Carmen

Resumen

La emisión de compuestos orgánicos volátiles ha sido considerado el principal riesgo a la salud, esta investigación está enfocada en determinar el nivel de riesgo asociado a la inhalación de BTEX en un sitio cercano a una estación de servicio (gasolinera) en Ciudad del Carmen, Campeche. Los compuestos, benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX), así como los parámetros meteorológicos fueron medidos en el aire ambiente en un sitio urbano durante la temporada de secas del 26 febrero al 6 marzo del 2024. Se analizaron un total de 30 muestras mediante cromatografía de gases con detección FID. La abundancia relativa de los BTEX fue: benceno ($4.30 \mu\text{g m}^{-3}$) > xileno ($4.11 \mu\text{g m}^{-3}$) > tolueno ($4.03 \mu\text{g m}^{-3}$) > etilbenceno ($3.73 \mu\text{g m}^{-3}$). Las concentraciones de BTEX fueron más elevadas durante el periodo de muestreo B2 que corresponde al horario de 12:00 a 13:00 h y cuando el viento tuvo una componente del SE, cuando el viento sopló del suroeste hacia el noroeste. Se evaluó la variabilidad espacial de los compuestos mediante herramientas geoestadísticas encontrándose que los niveles tienden a ser más altos hacia el noroeste de la zona de muestreo. Las razones B/T fueron ≤ 1 para los 3 horarios de muestreo, lo que significa que su origen proviene de emisiones vehiculares e inclusive de la estación de servicio. Las razones x/E fueron < 3.8 en todos los casos, lo que indica que las emisiones fueron recientes y de origen local, indicando que se trata de masas de aire frescas. El índice de riesgo de cáncer por exposición a benceno sobrepasó el valor de referencia propuesto por la US EPA (LTCR 1×10^{-6}); sugiriendo un riesgo significativo, y siendo aún más elevado para la población infantil. El potencial global de efectos no carcinogénicos fue determinado como un índice de riesgo HQ. En todos los casos se obtuvo un valor de $HQ < 1$ indicando que la población no está expuesta a un riesgo significativo de contraer enfermedades diferentes al cáncer (enfermedades respiratorias y cardiovasculares).

Palabras clave: BTEX, riesgo a la salud, muestreo activo, gasolineras, Campeche.

Abstract

The emission of volatile organic compounds, specifically benzene, toluene, ethylbenzene, and xylenes (BTEX), near a service station in Ciudad del Carmen, Campeche is a significant health concern. This research focused on assessing the risk associated with inhaling BTEX during the dry season from February 26 to March 6, 2024. Thirty air samples were collected at an urban site and analyzed using gas chromatography with FID detection. The concentrations of BTEX were found to be highest during the B2 sampling period, which occurred from 12:00 to 1:00 p.m. when the wind blew from the Southwest to the Northwest. Geostatistical tools were used to evaluate the spatial variability of the compounds, revealing higher levels towards the Northwest of the sampling area. The B/T ratios were less than or equal to 1 for the 3 sampling times, indicating that the emissions originated from vehicle and service station sources. The x/E ratios were less than 3.8 in all cases, suggesting that the emissions were recent and locally sourced, indicating fresh air masses. The cancer risk index for benzene exposure exceeded the reference value proposed by the US EPA (LTCR 1×10^{-6}), indicating a significant risk, especially for the child population. The overall potential for non-carcinogenic effects was assessed using the HQ risk index. In all cases, a value of $HQ < 1$ was obtained, indicating that the population is not exposed to a significant risk of contracting diseases other than cancer, such as respiratory and cardiovascular diseases.

Keywords: BTEX, Health risk, Active sampling, Gas stations, Campeche

Introducción

La OMS reporta que el 99 % de la población mundial respira un aire que supera los límites recomendados para la protección a la salud ya que contiene altos niveles de contaminantes; además, estos datos indican que la exposición es más elevada en los países de ingresos medianos y bajos, dentro de los cuales se encuentra México (WHO, 2023). La exposición a contaminantes del aire es el principal riesgo ambiental de la mortalidad prematura de la población de acuerdo con la carga global de morbilidad que publica la WHO. En el 2019 se reportaron 48 mil 331 muertes atribuibles a la contaminación atmosférica en México (IHME, 2019). Por lo tanto, la contaminación del aire constituye el principal riesgo ambiental para la salud causando aproximadamente 7 millones de muertes prematuras cada año.

Una publicación reciente del Banco Mundial encontró que la contaminación del aire le costó al mundo aproximadamente 8.1 billones de dólares en 2019, equivalente al 6.1 % del PIB mundial. Más del 95 por ciento de las muertes causadas por la contaminación del aire ocurren en países en desarrollo, y la carga económica de la contaminación asociada con la mortalidad y morbilidad prematuras es significativa, equivalente al 5-14 % del PIB en estos países (The World Bank, 2023). Adicionalmente, el impacto de la contaminación atmosférica sobre la salud, supera inclusive el correspondiente a otros factores de riesgo ampliamente reconocidos como lo son las enfermedades crónicas, tales como, la presión arterial, diabetes, consumo de tabaco, sobrepeso, colesterol alto y desnutrición (State of global air, 2019).

Los compuestos orgánicos volátiles (VOCs por sus siglas en inglés) comprenden un grupo de compuestos químicos que son emitidos a partir de líquidos altamente volátiles a temperatura ambiente, así como también a partir de procesos industriales (FAO & PNUMA, 2022). Este tipo de compuestos y sus productos de reacción a menudo representan un riesgo inaceptable para la salud pública y laboral, así como para los entornos biológicos y físicos (Bloemen & Burn, 1993). A este respecto, los contaminantes denominados BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y los tres isómeros de Xileno) en diversos estudios e investigaciones a nivel mundial se ha reportado que son potencialmente peligrosos para el medio ambiente y la salud de los seres humanos (Campos-Candel, Llobat-Estellés, & Mauri-Aucejo, 2007). Este tipo de compuestos si bien puede ser liberado a partir de fuentes naturales como incendios forestales, en su gran mayoría, es emitido por fuentes antropogénicas relacionadas con la extracción y combustión de petróleo y gas natural, así como actividades petroquímicas y diversos procesos industriales.

Debido a su naturaleza volátil, los seres humanos están expuestos a los VOCs principalmente vía inhalación. Ya sea que esta sea crónica o aguda, en ambos casos, se pueden tener graves consecuencias para la salud, como enfermedades neurológicas, cáncer y efectos teratogénicos (ATSDR, 2004). La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha estimado que 4 de cada 1 millón de personas corren el riesgo de desarrollar leucemia a lo largo de su vida cuando se exponen a 1 mg/m³ de benceno (PAHO & WHO, 2012).

Antecedentes

Los compuestos BTEX son considerados como contaminantes no criterio, debido a que no existe una norma que establezca los límites máximos permisibles en la atmósfera; por esta razón, no se tiene información disponible de mediciones continuas o sistemáticas de esos contaminantes en México. Por lo tanto, para establecer un marco teórico a manera de antecedentes de los niveles de compuestos BTEX en ambientes exteriores, se presenta el marco normativo disponible y una revisión sobre los resultados encontrados en otras investigaciones tanto a nivel nacional como internacional.

La principal diferencia entre los contaminantes criterio y no criterio es que, los primeros han sido estudiados extensivamente y existe amplia información sobre sus fuentes de emisión y sus impactos en la salud, de modo que se han establecido niveles máximos permisibles en el ambiente. Por otro lado, los contaminantes no criterio han comenzado a ser estudiados y no se cuentan con información suficiente para poder establecer un marco normativo en nuestro país. En otras palabras, cuando se habla de calidad del aire, los contaminantes no criterio son aquellos contaminantes no normados que no cuentan con indicadores y son considerados perjudiciales para la salud y el bienestar de las personas. (Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios, 2017). En el caso de los compuestos BTEX, son contaminantes no criterio, es decir, no existe una norma que regule sus niveles en el aire ambiente para proteger la salud de la población. Por lo tanto, para poder realizar un diagnóstico preliminar y poder establecer

si sus niveles presentes en la atmósfera de un sitio dado son aceptables o no, es necesario realizar una evaluación de riesgo a la salud.

Normatividad para contaminantes no criterio

La normatividad existente en nuestro país únicamente hace referencia a contaminantes criterio, sin embargo, no hay normatividades que regulen a los contaminantes no criterio liberados al aire ambiente; únicamente, se encuentran normas oficiales mexicanas que se enfocan en el reconocimiento, evaluación y control de agentes químicos en medio ambiente laboral y personal ocupacionalmente expuesto (POE). Por lo anterior, no existe normatividad mexicana que establezca los límites Máximos Permisibles (LMP) para los contaminantes BTEX liberados al aire ambiente. Al no tener una norma que nos indique los valores máximos de exposición, se pueden tomar las referencias internacionales como lo son la Organización Mundial de la salud (OMS), Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH) y algunas instancias gubernamentales de países extranjeros.

La OMS (2005) redactó las directrices mundiales sobre calidad del aire (DCA), aplicables a todo el mundo, que fueron creadas para minimizar los efectos sanitarios de la contaminación del aire y contienen recomendaciones relativas a niveles indicativos sobre la calidad del aire, así como las metas para los seis principales contaminantes del aire. En la tabla 1 podemos ver los valores de referencia establecidos por la NIOSH para las concentraciones de los contaminantes no criterio.

Antecedentes a nivel nacional

Se han realizado algunos estudios de BTEX en aire ambiente en algunos otros sitios del país. A continuación, se hace una breve revisión de los resultados obtenidos en estudios previos. García *et al.* (2014) estudiaron la Emisión de BTEX en gasolineras de Ensenada, Baja California, México. Los sitios elegidos están ubicados en zonas de alta densidad poblacional y tráfico vehicular, siendo un total de 37 estaciones de servicio (gasolineras) las que fueron estudiadas (ver tabla 2).

García *et al.* (2014) concluyen que la exposición humana a compuestos orgánicos volátiles, como benceno, tolueno y xileno (BTEX), tiene varios efectos sobre la salud a corto y largo plazo en hombres, mujeres y niños porque estos compuestos tienen la capacidad de interactuar con el genoma y el epigenoma durante el proceso de División celular en células somáticas y germinales. Las emisiones de BTEX por la presencia de ga-

solineras en el casco urbano, se asocian con un mayor riesgo para la salud de la población (García *et al.*, 2014). La metodología estuvo basada en la aplicación del Sistema de Información Geográfica (SIG), utilizando los programas SIG PC ARC/INFO para la digitalización y ARCVIEW para la visualización y creación de atributos. Los mapas resultantes mostraron una mayor presencia de BTEX en las zonas más cercanas a las estaciones de servicio. García *et al.* (2014) identificaron que las altas emisiones de BTEX en las gasolineras de Ensenada pueden deberse a la falta de un sistema para retirar y recuperar los vapores en las bombas de despacho de gasolina de las estaciones de servicio y no tanto en el trasiego de combustible de las pipas a los tanques de almacenamiento.

Por otro lado, Cerón *et al.* (2018) realizaron un estudio en la ciudad de Tijuana, Baja California, México, en donde caracterizaron y determinaron la fuente de los hi-

Tabla 1. Límite máximo de exposición.

Compuesto	Límite máximo de exposición, horas	Fuente
Benceno	1 ppm, 3.25 mg m ⁻³ , 24 h	NIOSH, 1976
Tolueno	100 ppm, 375 mg m ⁻³ , 10 h	NIOSH, 1973
Etilbenceno	100 ppm, 435 mg m ⁻³ , 10 h	OSHA, 2021
O-Xileno	100 ppm, 435 mg m ⁻³ , 10 h	NIOSH, 2014
m-Xileno	100 ppm, 435 mg m ⁻³ , 10 h	NIOSH, 2014
p-Xileno	100 ppm, 435 mg m ⁻³ , 10 h	NIOSH, 2014

Tabla 2. Concentraciones anuales de BTEX (toneladas por año) Ensenada, Baja California, México (2014).

Año	Benceno	Tolueno	Etilbenceno	mp-Xileno	o-Xileno
2010	18.17	54.99	0.078	3.35	1.40
2011	17.70	53.57	0.075	3.26	1.36
2012	14.40	43.58	0.061	2.65	1.11

drocarburos aromáticos (BTEX). Las muestras fueron recolectadas en un intervalo de 4 periodos de muestreo (B1: 07:30-09:00 h, B2: 12:00-13:30 h, B3: 15:00-16:30 h, B4: 18:00- 19:30 h), colectando un total de 24 muestras durante enero 2017 (tabla 3).

Los compuestos BTEX mostraron un patrón diurno en el sitio del estudio, donde las concentraciones más altas de BTEX se produjeron durante los períodos de muestreo de la mañana y la tarde, y donde el benceno fue el compuesto aromático más abundante seguido por el p-Xileno, tolueno y etilbenceno. A partir de la correlación de Pearson y el análisis de componentes principales, se pudo confirmar que, durante el período de muestreo, el tráfico vehicular fue la principal fuente de benceno, tolueno y p-xileno; y que el tolueno y el p-xileno podrían contribuir al ozono troposférico. De igual manera mediante el análisis meteorológico se encontró que los niveles de BTEX fueron influenciados por emisiones locales y frescas (tráfico vehicular) (Cerón *et al.*, 2018).

Cerón *et al.* (2020) evaluaron el riesgo para la salud de los niveles de BTEX en el aire ambiente de la estación de monitoreo

CICEG, perteneciente a la red de monitoreo del estado de Guanajuato, México. Este sitio se encuentra en la zona industrial y de mayor densidad poblacional. Se colectaron tres muestras de BTEX diarias durante una semana por la mañana, mediodía y por la tarde. El muestreo se realizó durante dos estaciones climáticas: verano (6-13 de agosto de 2018) y otoño (5-14 de octubre de 2018), obteniendo un total de 48 muestras (tabla 4).

La prueba de Mann-Whitney reveló diferencias significativas en la concentración de BTEX entre verano y otoño, de igual manera con esta prueba encontraron diferencias significativas entre verano y otoño en cuanto a velocidad, dirección y temperatura del viento, lo que indica que las masas de aire que se transportan desde estas direcciones podrían contribuir a los niveles de BTEX y estuvieron más influenciadas por fuentes locales y regionales (emisiones industriales y tráfico intensidad) que por actividad fotoquímica. A partir de la tabla 9 se observa que los niveles de BTEX fueron mayores durante el verano, esto debido a que las velocidades del viento fueron mayores durante esta temporada. El riesgo de cáncer estimado (valores LTCR)

Tabla 3. Concentraciones promedio de BTEX (µg m ⁻³) en Tijuana, Baja California, México (Enero 2017).				
Sitio	Benceno	Tolueno	Etilbenceno	p-Xileno
Tijuana, Baja California México (µg m ⁻³)	32.40	13.28	7.02	17.16

Tabla 4. Concentración promedio de BTEX (µg m ⁻³) en León, Guanajuato (2020).				
Temporada	Benceno	Tolueno	Etilbenceno	Xileno
Verano y otoño (µg m ⁻³)	1.73	11.85	11.86	3.31
Verano (µg m ⁻³)	2.633	15.78	15.28	3.46

para adultos y niños estuvo en el rango de 5.26×10^{-6} a 4.33×10^{-5} , valores que exceden el valor límite establecido por la EPA de EUA (1×10^{-6}). Los valores de LTCR también superaron, el valor límite establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) (1×10^{-5}) (Cerón *et al.*, 2020).

Por otro lado, en un estudio realizado por Esteves *et al.* (2015) en la ciudad de Orizaba, Veracruz, se determinaron los niveles de BTEX en aire ambiente y los niveles de riesgo carcinogénico de benceno en un sitio urbano, colectando un total de 36 muestras, del 7 de Noviembre al 29 de Noviembre de 2014, durante la estación de otoño (tabla 5).

Los autores concluyen que los niveles de BTEX estuvieron fuertemente influenciados por los vientos provenientes del S y SSE, en donde el factor principal fue la autopista Veracruz-México, indicando que estos compuestos fueron principalmente originados por fuentes vehiculares. El análisis PCA mostró que el Benceno estuvo fuertemente influenciado por emisiones vehiculares. Los resultados encontrados para Benceno fueron mayores a los límites máximos permisibles establecidos en Europa y Estados Unidos. La exposición diaria promedio para el sitio de estudio fue de $22.83 \times 10^{-3} \text{ mg kg}^{-1} \text{ día}^{-1}$. El riesgo de cáncer por benceno en el tiempo de vida (LTCR) fue de 68×10^{-5} , excediendo el valor aceptable de LTCR de 1×10^{-6} para adultos, de acuerdo a la US EPA. Los autores reportan que, el potencial de riesgo de cáncer

debido a la exposición de benceno ambiental por inhalación debería de ser de interés para las autoridades de salud en la región de Orizaba, Veracruz, México. En el caso del riesgo de no cáncer, los valores de HQ estuvieron en el rango de 2.483-3.038; estos valores exceden el valor límite establecido por la US EPA, de acuerdo al cual, si el valor de HQ es mayor a 1, el contaminante representa un riesgo de producir efectos cardiovasculares y respiratorios, entre otros.

Justificación

El desmedido crecimiento poblacional, el aumento de la huella urbana, el mayor uso de los recursos naturales, energías y transporte dan como resultado la emisión de contaminantes al aire ambiente de muchas ciudades de todo el mundo (Lan & Minh, 2013). La contaminación del aire causa alteración de los ecosistemas y genera costos económicos y sociales, y también genera riesgos importantes para la salud humana a escala local y regional en todo el mundo. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), se estimó que la contaminación del aire ambiente (exterior) tanto en las ciudades como en las zonas rurales causó 4.2 millones de muertes prematuras al año en todo el mundo en 2019; esta mortalidad se debe a la exposición a partículas finas, que causan enfermedades cardiovasculares y respiratorias, y diferentes tipos de cáncer (WHO, 2022).

Tabla 5. Concentraciones promedio de BTEX ($\mu\text{g m}^{-3}$) en Orizaba, Veracruz, México (2015).

Sitio	Benceno	Tolueno	Etilbenceno	Xileno
Orizaba, veracruz, México ($\mu\text{g m}^{-3}$)	74.51	5.33	2.26	3.35

La oms estima que en 2019, alrededor del 37% de las muertes prematuras relacionadas con la contaminación del aire exterior se debieron a cardiopatía isquémica y accidente cerebrovascular, el 18 % y el 23 % de las muertes se debieron a enfermedad pulmonar obstructiva crónica e infecciones agudas de las vías respiratorias inferiores, respectivamente, y el 11 % de las muertes se debieron a cáncer en el tracto respiratorio (WHO, 2022), lo que demuestra la importancia de medir la calidad del aire ambiente.

Dentro de los contaminantes del aire más peligrosos se encuentran los compuestos orgánicos volátiles (COV) (Bloemen & Burn, 1993; FAO & PNUMA, 2022). La evaluación de compuestos orgánicos volátiles (COV) se ha convertido en un importante campo de interés en la contaminación atmosférica, esto debido a su composición físicoquímica, ya que son altamente volátiles, liposolubles, tóxicos e inflamables, al ser muy reactivos contribuyen a la formación de ozono y, por tanto, al cambio climático (Finlayson & Pitts, 1993).

Dentro de los COV, se encuentran benceno, tolueno, etilbenceno y o-, p-y m-xileno (BTEX). Los BTEX se emiten a la atmósfera desde fuentes tanto antropogénicas como biogénicas y, además, pueden formarse fotoquímicamente (FAO & PNUMA, 2022). Estudios demuestran que en ciudades altamente pobladas e industrializadas pueden ser importantes para la carga total de VOC de la atmósfera (Yalcin *et al.*, 2020).

Los hidrocarburos monoaromáticos benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos, son fuentes de una variedad de efectos adversos para la salud, como asma, mareos, fatiga e irritación de ojos, nariz y garganta. Además, las náuseas y síntomas inespecíficos similares también se han asociado con BTEX (U.S. Environmental Protection Agency, 1987, 1991). La exposición de BTEX para los humanos son a través del sistema respiratorio o por contacto con la piel (Li *et al.*, 2014).

En países en desarrollo como el nuestro, es usual la contratación de ayudantes para bombear combustible a los clientes en las estaciones de servicio. Los ayudantes están en contacto directo con los vehículos los cuales usan combustibles sin plomo de varios octanos, gasolina sustitutiva del plomo y diésel, este personal corre el riesgo de sufrir efectos adversos para la salud asociados con la inhalación de COV liberados por estos combustibles. Los contaminantes liberados incluyen benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX), que son importantes por su alto nivel de toxicidad. De este modo, el personal de dichas estaciones, presenta una exposición a largo plazo lo cual puede provocar efectos adversos para la salud y a su vez generan afectaciones al medio ambiente.

Por lo anterior el presente trabajo está enfocado en determinar la variación diurna de BTEX en aire ambiente de una estación de servicio (gasolinera) durante la estación seca utilizando muestreadores activos.

Metodología

Área de estudio

El Estado de Campeche está ubicado en la región sureste de la República Mexicana. Colinda al norte con el estado de Yucatán; al este con el estado de Quintana Roo y con Belice; al sur con la república de Guatemala; al oeste con el estado de Tabasco y el golfo de México. Tiene una extensión territorial de 57 507 km². La población total del estado de Campeche es de 928 363, lo que representa el 0.7 % del total del país (INEGI, 2020).

El clima predominante en el estado es cálido subhúmedo en el 92 % de su territorio, el 7.75 % presenta clima cálido húmedo localizado en la parte este del estado y en la parte norte, un pequeño porcentaje del 0.05% con clima semi-seco. La temperatura media anual es de 26 a 27 °C, la temperatura más alta frecuentemente es mayor a 30 °C y la mínima de 18 °C. Las lluvias son de abundantes a muy abundantes durante el verano. La precipitación total anual varía entre 1200 y 2000 mm, mientras que, en la región norte, de clima semi-seco, es de alrededor de 800 mm anuales (INEGI, 2020).

Ciudad del Carmen es cabecera del municipio de Carmen, en el estado de Campeche. Se localiza al suroeste de la península de Yucatán, en la parte occidente de la isla del Carmen, está situada entre el golfo de México y la laguna de Términos. La actividad principal de la ciudad es la producción y extracción de petróleo, siendo la zona de mayor producción en el Estado. Ciudad del Carmen ha sido considerada el primer puerto a nivel nacional en materia de logística de transporte de personal y de material a las

plataformas petroleras de la sonda de Campeche, por lo que actualmente cuenta con un total de 20 estaciones de servicio que suministran gasolina y diésel en donde se beneficia la población y a más de 100 empresas que hacen sus operaciones en la zona y que a su vez traen efectos medio ambientales por el consumo de dichos combustibles.

El presente trabajo tiene por objeto evaluar los niveles de BTEX en aire ambiente de un sitio influenciado por la actividad urbana y petrolera en el municipio de Carmen, Campeche. Por lo anterior, el sitio de muestreo se estableció en una estación de servicio (gasolinera) más frecuentada por los automovilistas y medios de transporte. La ubicación del sitio de muestreo se presenta en la figura 1, y las características y uso de suelo se muestran en la figura 2.

Muestreo

Se realizó un muestreo activo de aire ambiente de acuerdo al método: “Determinación de hidrocarburos aromáticos (benceno, tolueno, etilbenceno, p-xileno, 1, 2, 4-trimetilbenceno) en aire-Método de adsorción en carbón activo/Cromatografía de gases”, método aceptado por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) (MTA/MA-O3O/A92) (INSHT, 1995).

Se colectaron un total de 30 muestras de aire ambiente en tubos de vidrio que en su interior contienen carbón activado de marca 226-01 Anasorb CSC de SKC que tienen las siguientes características: 7 cm de longitud, 6 mm de diámetro externo y 4 mm de diámetro interno, conteniendo dos secciones de carbón activo separadas por una porción



Figura 1. Ubicación del sitio de muestreo IMP.

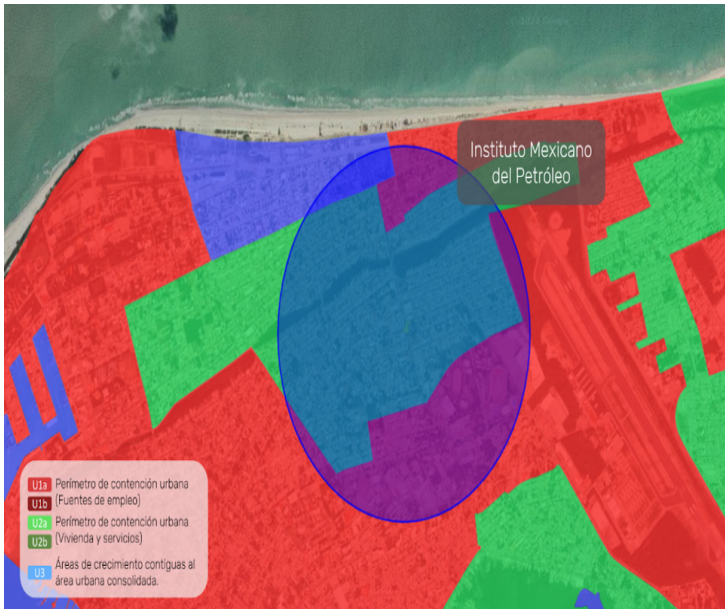


Figura 2. Características y uso de suelo del sitio de muestreo IMP.

de espuma de poliuretano de 2 mm (figura 3). Cabe mencionar que los tubos deberán de disponer de tapones de polietileno que ajusten bien, para prevenir fugas y contaminación durante el transporte y almacenamiento de las muestras.

Se hizo pasar aire ambiente por medio de una bomba de vacío tipos GAST con un flujo controlado de 200 mL min^{-1} a través de los tubos que son colocados horizontalmente rompiendo los extremos de ambas secciones de forma que la sección 2 (con 50 mg de carbón activado) del tubo quede fijamente colocada sobre un porta tubo de goma o plástico de longitud y diámetro adecuado. De igual manera al colocar el tubo se cubrió con papel aluminio, esto con la finalidad de evitar que haya reacciones fotoquímicas y genere interferencias al momento de la lectura de las muestras.

El proceso de obtención de muestras de aire ambiente se realizó en tres periodos de tiempo los cuales fueron catalogados en base a la variación diurna por la mañana B1 (7:00 h a 8:30 h), medio día B2 (13:00 h a 14:30 h) y tarde B3 (18:00 h a 19:30 h) con du-

ración de 1.5 h, obteniendo un total de 30 muestras a lo largo de 10 días de muestreo en la temporada de secas 2024. Al concluir cada muestreo, se procedió a tapar y etiquetar cada tubo, y se guardaron en bolsas especiales que evitan el contacto directo con la luz solar para evitar posibles reacciones fotoquímicas, y posteriormente se mantuvieron en refrigeración para conservarlas no más de 20 días hasta su análisis en el laboratorio de Protección Ambiental de la Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR).

Análisis químicos

El análisis químico se llevó a cabo en el laboratorio de Protección Ambiental de la Universidad Autónoma del Carmen bajo el método establecido por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene de España, Métodos de Toma de Muestra y Análisis MTA/MA-O3O/A92 (INSHT, 1995). Se elaboraron curvas de calibración utilizando disoluciones de grado reactivo al 99.98 % de pureza de la marca Sigma-Aldrich. Para llevar a cabo la desorción, ésta se realizó por desorción química, y se utilizarán viales color ámbar de 2 mL con tapas y septas, los cuales fueron etiquetados y sometidos a un pre-tratamiento mediante el enjuagado de los viales junto con sus tapas y septas con agua destilada, posteriormente se secaron los viales para evitar residuos de agua, seguido de esto se agregó una pequeña cantidad de disulfuro de carbono grado HPLC como reactivo desorbente y se procedió a esperar el secado. Este proceso se hace con la finalidad de evitar contaminación de las muestras con impurezas que puedan contener los viales previos a su utilización y evitar interferencias a la hora de determinar las concentraciones.

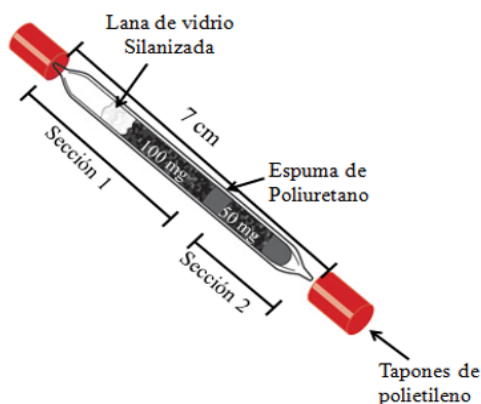


Figura 3. Características de los tubos de muestreo activo.

Una vez realizado el pre-tratamiento del material, se procedió a realizar la desorción, para lo cual se rompió cuidadosamente el extremo de la sección 1 del tubo donde se encuentra la lana de vidrio, se retiró cuidadosamente dicha lana por medio de una pinza metálica sin tirar alguna cantidad significativa de carbón, posterior a esto se vació dicha sección en el vial y se agregaron 2 mL de CS_2 con micropipetas graduadas, se cerró herméticamente el vial percatándose de que se haya hecho correctamente y se procedió a repetir los pasos anteriormente detallados para la otra sección del tubo (sección 2) y también para cada una de las muestras. Una vez realizado esto, se agitó vigorosa y constantemente por un lapso de 5 min para asegurarse que la desorción sea máxima y se resguardaron en refrigeración un tiempo máximo de 24 h para luego analizarlas por cromatografía de gases.

Análisis estadístico

Se realizó el análisis estadístico a los datos de concentración de BTEX y datos meteorológicos con apoyo del paquete estadístico de Excel XLSTAT versión 2019. Se utilizaron herramientas estadísticas tales como:

- Correlación de Pearson para identificar las relaciones bivariadas entre BTEX, contaminantes criterio y variables meteorológicas.
- Análisis de componentes principales (PCA) para explicar la varianza y descubrir la estructura del conjunto de datos. Los resultados de PCA son útiles para identificar, por ejemplo, si un contaminante es secundario o primario, o para identificar la fuente específica de los contaminantes.

- Pruebas no paramétricas de Friedman ($\alpha = 0.05$) para evaluar las diferencias entre los períodos de muestreo de las concentraciones de contaminantes atmosféricos medidos, es decir, para determinar si los datos estudiados proceden de la misma población o no y para inferir si existe variación diurna de manera significativa. Esto permite definir si existen o no diferencias significativas entre horarios de muestreo (variación diurna).
- Diagrama de cajas para mostrar la estadística descriptiva de los resultados obtenidos: las concentraciones, medias, máximas y promedio de cada uno de los hidrocarburos aromáticos. De esta forma es posible identificar fácilmente que contaminante presentó las concentraciones promedio más altas e incluso si se presentó algún patrón diurno o tendencia durante el muestreo.

Análisis meteorológico

El análisis de vientos se realizó para determinar el origen de los BTEX de acuerdo a la dirección en la que el viento sopló durante los diez días de muestreo. Se utilizó el programa Windrose y el software cartográfico Google Earth para realizar las Rosas de los vientos y así conocer la dirección de los vientos por día e identificar las posibles fuentes de emisión. Posteriormente para un análisis más detallado, con ayuda de Excel se estimó el viento promedio por periodo de muestreo, es decir, mañana, tarde y noche de los 10 días de muestreo, con el fin de identificar la dirección del viento predominante durante los periodos del muestreo (histograma de frecuencias de vientos). A partir de la National Oceanic and Atmospheric Adminis-

tration (NOAA), se tuvo acceso al modelo de trayectoria HYSPLIT, que permite estimar las trayectorias regresivas de las masas de aire, con la finalidad de identificar si se tuvo o no influencia regional. El análisis de trayectorias regresivas permite determinar los orígenes y fuentes de los contaminantes. Finalmente, se realizaron gráficas de telaraña para mostrar visualmente de donde provienen las concentraciones de BTEX (NOAA, 2024).

Análisis de riesgo

El potencial carcinogénico de benceno es ampliamente conocido (Moolla *et al.*, 2015). La Unión Europea recomienda un límite anual de $5 \mu\text{g m}^{-3}$ para benceno en aire ambiente, mientras que la US EPA establece un valor de 4.0 ppbV para este contaminante (US EPA, 2012). Para determinar la exposición diaria (E), el potencial de riesgo de cáncer (LTCR) y el potencial de no riesgo de cáncer (HQ), se usará la metodología propuesta por Zhang *et al.* (2012). La exposición diaria (mg kg^{-1} por día) de un individuo por inhalación puede ser calculada como:

$$E = \frac{C * Ira * Da}{Bwa}$$

En donde:

C (mg m^{-3}), es la concentración promedio de benceno.

Ira , es la tasa de inhalación de un adulto ($0.83 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1}$) (US EPA, 1998)

Da , es la duración de la exposición de un adulto (24 hr día^{-1})

Bwa , es el peso del cuerpo de un adulto promedio -- 65 kg -- (US EPA, 1998).

Por otro lado, el riesgo de cáncer en el tiempo de vida (The Lifetime Cancer Risk: LTCR) es calculado como:

$$LTCR = E * SF$$

En donde:

E , es la exposición diaria de un individuo por inhalación.

SF , es el factor de la pendiente de riesgo por inhalación de tóxicos cuando el efecto carcinogénico por exposición es considerado como lineal. Aquí se consideró el valor propuesto de SF para benceno (0.029 kg mg^{-1} por día) de acuerdo a la US EPA 2014.

Finalmente, el riesgo no cancerígeno de los BTEX fue medido como un cociente de riesgo (HQ):

$$HQ = \frac{C}{Rfc}$$

En donde:

C , es la concentración promedio recibida diariamente ($\mu\text{g m}^{-3}$).

Rfc , es la concentración de referencia de inhalación, propuestas por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos para benceno ($0.03 \mu\text{g m}^{-3}$), tolueno ($5 \mu\text{g m}^{-3}$), etilbenceno ($1 \mu\text{g m}^{-3}$) y xileno ($0.1 \mu\text{g m}^{-3}$) (US EPA, 2012).

Resultados

Estadística descriptiva

En el caso de Benceno, en el horario B1 se obtuvo una concentración promedio de $3.84 \mu\text{g m}^{-3}$, con valores máximo y mínimo de 5.44 y 3.15, respectivamente, y una desviación estándar de $0.64 \mu\text{g m}^{-3}$. Para el horario B2 se obtuvo una concentración promedio de $4.96 \mu\text{g m}^{-3}$, con valores máximo y mínimo de 7.81 y 3.07, respectivamente, y una desviación estándar de $1.77 \mu\text{g m}^{-3}$. Finalmente, para el caso del horario B3, se obtuvo una concentración promedio de $4.11 \mu\text{g m}^{-3}$, con valores máximo y mínimo de 5.67 y 3.12, respectivamente, y una desviación estándar de $0.77 \mu\text{g m}^{-3}$.

En la figura 4 se presenta la estadística descriptiva para las concentraciones de benceno durante los 3 horarios de muestreo en el sitio de estudio. A partir de esto se puede observar que, las concentraciones de benceno fue-

ron significativamente más elevadas durante el periodo de muestreo B2 que corresponde al horario de 12:00 a 13:00 h.

Sin embargo, para poder determinar si estas diferencias son significativas desde el punto de vista estadístico, se aplicó una prueba de hipótesis. Puesto que, al hacer la prueba de normalidad de los datos de concentración obtenidos para benceno durante los 3 horarios de muestreo, se encontró que siguen una distribución normal, se procedió a aplicar la prueba paramétrica de Friedman para determinar si las diferencias observadas en la concentración de benceno en los diferentes horarios de muestreo son significativas o no.

Para esto, se establecieron la hipótesis nula H_0 : Las muestras vienen de una misma población, y la hipótesis alternativa: Las muestras no vienen de la misma población.

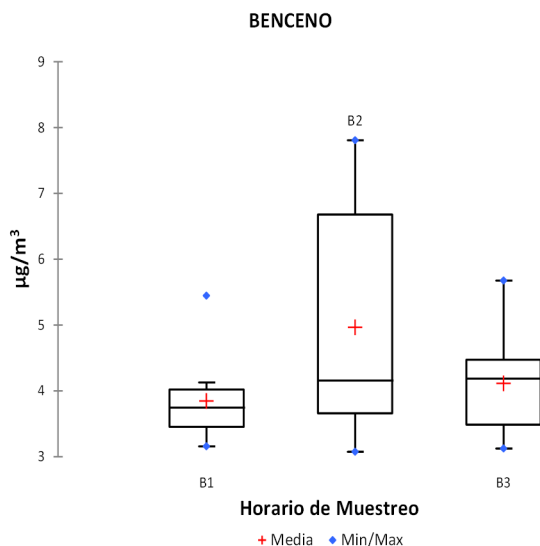


Figura 4. Estadística descriptiva para Benceno en el sitio de muestreo.

A partir de la tabla 6 se observa que el valor-p calculado es mayor que el nivel de significación $\alpha=0.05$, por lo tanto, no se puede rechazar la hipótesis nula. Es decir, se puede concluir que, las diferencias encontradas entre las concentraciones de benceno en los diferentes horarios de muestreo no fueron significativas. En el caso de Tolueno, en el horario B1 se obtuvo una concentración promedio de $3.69 \mu\text{g m}^{-3}$, con valores máximo y mínimo de 5.75 y 3.18, respectivamente, y una desviación estándar de $0.77 \mu\text{g m}^{-3}$.

Para el horario B2 se obtuvo una concentración promedio de $4.41 \mu\text{g m}^{-3}$, con valores máximo y mínimo de 7.22 y 2.89, respectivamente, y una desviación estándar de $1.52 \mu\text{g m}^{-3}$. Finalmente, para el caso del horario B3, se obtuvo una concentración promedio de $3.99 \mu\text{g m}^{-3}$, con valores máximo y mínimo de 5.46 y 3.03, respectivamente, y una desviación estándar de $0.86 \mu\text{g m}^{-3}$.

En la figura 5 se presenta la estadística descriptiva para las concentraciones de tolueno durante los 3 horarios de muestreo en

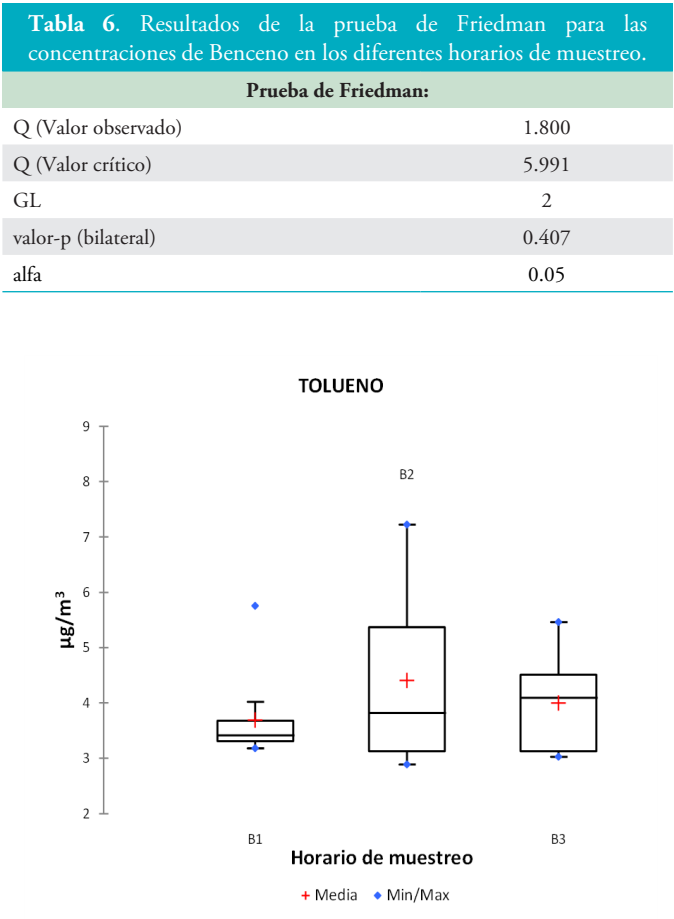


Figura 5. Estadística descriptiva para Tolueno en el sitio de muestreo.

el sitio de estudio. A partir de esto se puede observar que, al igual que en el caso de benceno, las concentraciones de tolueno fueron significativamente más elevadas durante el periodo de muestreo B2 que corresponde al horario de 12:00 a 13:00 h.

Sin embargo, para poder determinar si estas diferencias son significativas desde el punto de vista estadístico, se aplicó una prueba de hipótesis. Puesto que, al hacer la prueba de normalidad de los datos de concentración obtenidos para tolueno durante los 3 horarios de muestreo, se encontró que no siguen una distribución normal, se procedió a aplicar la prueba paramétrica de Friedman para determinar si las diferencias observadas en la concentración de tolueno en los diferentes horarios de muestreo son significativas o no. Para esto, se establecieron la hipótesis nula H_0 : Las muestras vienen de una misma población, y la hipótesis alternativa: las muestras no vienen de una misma población. A partir de la tabla 7 se observa que el valor-p calculado es mayor que el nivel de significación $\alpha=0.05$, por lo tanto, se debe aceptar la hipótesis nula y rechazar la hipótesis alternativa. Es decir, se puede concluir que, las diferencias encontradas entre las concentraciones de tolueno en los diferentes horarios de muestreo no fueron significativas.

En el caso de Etilbenceno, en el horario B1 se obtuvo una concentración promedio de $3.66 \mu\text{g m}^{-3}$, con valores máximo y mínimo de 3.83 y 3.54, respectivamente, y una desviación estándar de $0.10 \mu\text{g m}^{-3}$. Para el horario B2 se obtuvo una concentración promedio de $3.78 \mu\text{g m}^{-3}$, con valores máximo y mínimo de 4.23 y 3.50, respectivamente, y una desviación estándar de $0.23 \mu\text{g m}^{-3}$. Finalmente, para el caso del horario B3, se obtuvo una concentración promedio de $3.75 \mu\text{g m}^{-3}$, con valores máximo y mínimo de 3.93 y 3.54, respectivamente, y una desviación estándar de $0.12 \mu\text{g m}^{-3}$.

En la figura 6 se presenta la estadística descriptiva para las concentraciones de etilbenceno durante los 3 horarios de muestreo en el sitio de estudio. A partir de esto se puede observar que, al igual que en el caso de benceno y tolueno, las concentraciones de etilbenceno fueron significativamente más elevadas durante el periodo de muestreo B2 que corresponde al horario de 12:00 a 13:00 h. Sin embargo, para poder determinar si estas diferencias son significativas desde el punto de vista estadístico, se aplicó una prueba de hipótesis. Puesto que al hacer la prueba de normalidad de los datos de concentración obtenidos para etilbenceno durante los 3 horarios de muestreo, se encontró que siguen una distribución normal, se

Tabla 7. Resultados de la prueba de Friedman para las concentraciones de Tolueno en los diferentes horarios de muestreo.	
Prueba de Friedman:	
Q (Valor observado)	0.600
Q (Valor crítico)	5.991
GL	2
valor-p (bilateral)	0.741
alfa	0.05

procedió a aplicar la prueba no paramétrica de Levene para determinar si las diferencias observadas en la concentración de etilbenceno en los diferentes horarios de muestreo son significativas o no.

Para esto, se establecieron la hipótesis nula H_0 : Las varianzas son idénticas, y la hipótesis alternativa: Al menos una de las varianzas es diferente de la otra. A partir de la tabla 8 se observa que el valor-p calculado es menor

que el nivel de significación $\alpha=0.05$, por lo tanto, se debe rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alternativa. Es decir, se puede concluir que, las diferencias encontradas entre las concentraciones de etilbenceno en los diferentes horarios de muestreo si fueron significativas.

En el caso de Xileno, en el horario B1 se obtuvo una concentración promedio de $3.90 \mu\text{g m}^{-3}$, con valores máximo y mínimo

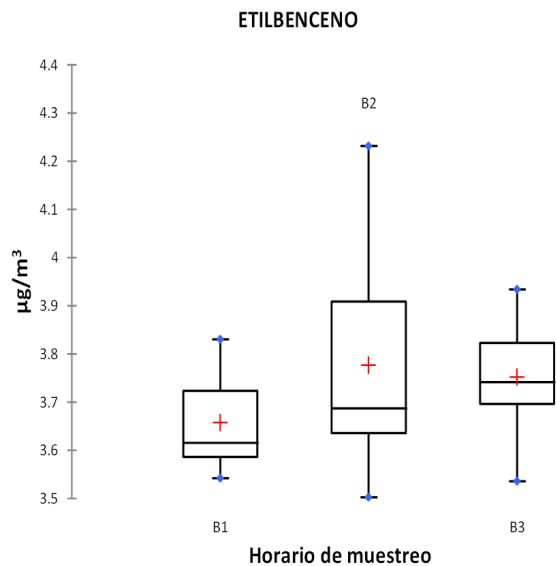


Figura 6. Estadística descriptiva para Etilbenceno en el sitio de muestreo.

Tabla 8. Resultados de la prueba de Levene para las concentraciones de Etilbenceno en los diferentes horarios de muestreo.	
Prueba de Levene (Media) / Prueba bilateral (B1):	
F (Valor observado)	4.343
F (Valor crítico)	3.354
GL1	2
GL2	27
valor-p (unilateral)	0.023
alfa	0.05

de 4.28 y 3.58, respectivamente, y una desviación estándar de $0.27 \mu\text{g m}^{-3}$. Para el horario B2 se obtuvo una concentración promedio de $4.29 \mu\text{g m}^{-3}$, con valores máximo y mínimo de 5.83 y 3.40, respectivamente, y una desviación estándar de $0.76 \mu\text{g m}^{-3}$. Finalmente, para el caso del horario B3, se obtuvo una concentración promedio de $4.13 \mu\text{g m}^{-3}$, con valores máximo y mínimo de 4.61 y 3.46, respectivamente, y una desviación estándar de $0.36 \mu\text{g m}^{-3}$. En la figura 7 se presenta la estadística descriptiva para las concentraciones de xileno durante los 3 horarios de muestreo en el sitio de estudio. A partir de esto se puede observar que, al igual que en el caso de benceno, tolueno y etilbenceno, las concentraciones de xileno fueron significativamente más elevadas durante el periodo de muestreo B2 que corresponde al horario de 12:00 a 13:00 h.

Sin embargo, para poder determinar si estas diferencias son significativas desde el punto de vista estadístico, se aplicó una prueba de hipótesis. Puesto que, al hacer la prueba de normalidad de los datos de concentración obtenidos para xileno durante los 3 horarios de muestreo, se encontró que no siguen una distribución normal, se procedió a aplicar la prueba no paramétrica de Levene para determinar si las diferencias observadas en la concentración de xileno en los diferentes horarios de muestreo son significativas o no.

Para esto, se establecieron la hipótesis nula H_0 : Las varianzas son idénticas, y la hipótesis alternativa: al menos una de las varianzas es diferente de la otra. A partir de la tabla 9 se observa que el valor-p calculado es menor que el nivel de significación $\alpha=0.05$, por lo tanto, se debe rechazar la hipótesis nula y

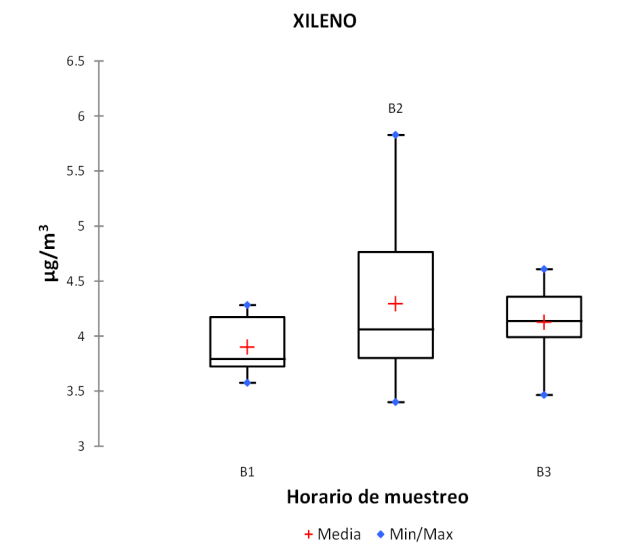


Figura 7. Estadística descriptiva para Xileno en el sitio de muestreo.

Tabla 9. Resultados de la prueba de Levene para las concentraciones de Xileno en los diferentes horarios de muestreo.	
Prueba de Levene (Media) / Prueba bilateral (B1):	
F (Valor observado)	5.047
F (Valor crítico)	3.354
GL1	2
GL2	27
valor-p (unilateral)	0.014
alfa	0.05

aceptar la hipótesis alternativa. Es decir, se puede concluir que, las diferencias encontradas entre las concentraciones de xileno en los diferentes horarios de muestreo si fueron significativas.

Análisis meteorológico

En la figura 8 se presentan las rosas de viento vs concentración para cada uno de los compuestos BTEX. En la figura 8 (a) se observa que, para el caso de benceno, las concentraciones fueron más elevadas cuando el viento sopla del E-SE. En la figura 8 (b) se observa que las concentraciones de tolueno fueron más altas cuando el viento vino del SE y N. En la figura 8 (c) se observa que, para el caso del etilbenceno, las concentraciones más altas se presentaron cuando el viento sopla del E-SE. Finalmente, las concentraciones de xileno fueron más elevadas cuando el viento tuvo una componente del E-NE (figura 8 d)

Análisis Bivariado y Análisis de Componentes Principales

Con la finalidad de identificar correlaciones significativas entre los compuestos BTEX y entre los compuestos BTEX y las variables me-

teorológicas, se realizó un análisis bivariado aplicando correlación de Pearson (tabla 10). A partir de la tabla 10, se puede observar que se obtuvo una correlación significativa entre tolueno-benceno (0.978), benceno-etilbenceno (0.813), tolueno-etilbenceno (0.916), benceno-xileno (0.930), tolueno-xileno (0.986), xileno-etilbenceno (0.970), temperatura-benceno (0.748), temperatura-tolueno (0.870), temperatura-etilbenceno (0.995), temperatura-xileno (0.940). Así mismo, se observaron correlaciones inversas significativas entre humedad-benceno (-1), humedad-tolueno (-0.974), humedad-etilbenceno (-0.803), humedad-xileno (-0.923) y humedad-temperatura (-0.736). A diferencia de la humedad y la temperatura, la presión atmosférica no mostró ninguna correlación significativa con los compuestos BTEX ni tampoco con el resto de las variables meteorológicas.

Se realizó el análisis de componentes principales (ACP) aplicado a los datos de concentración de BTEX obtenidos en el sitio de muestreo. A partir de la tabla 11, se puede observar 2 factores fueron suficientes para explicar la variabilidad de los datos, contribuyendo con un 79.39 % y un 20.610 %,

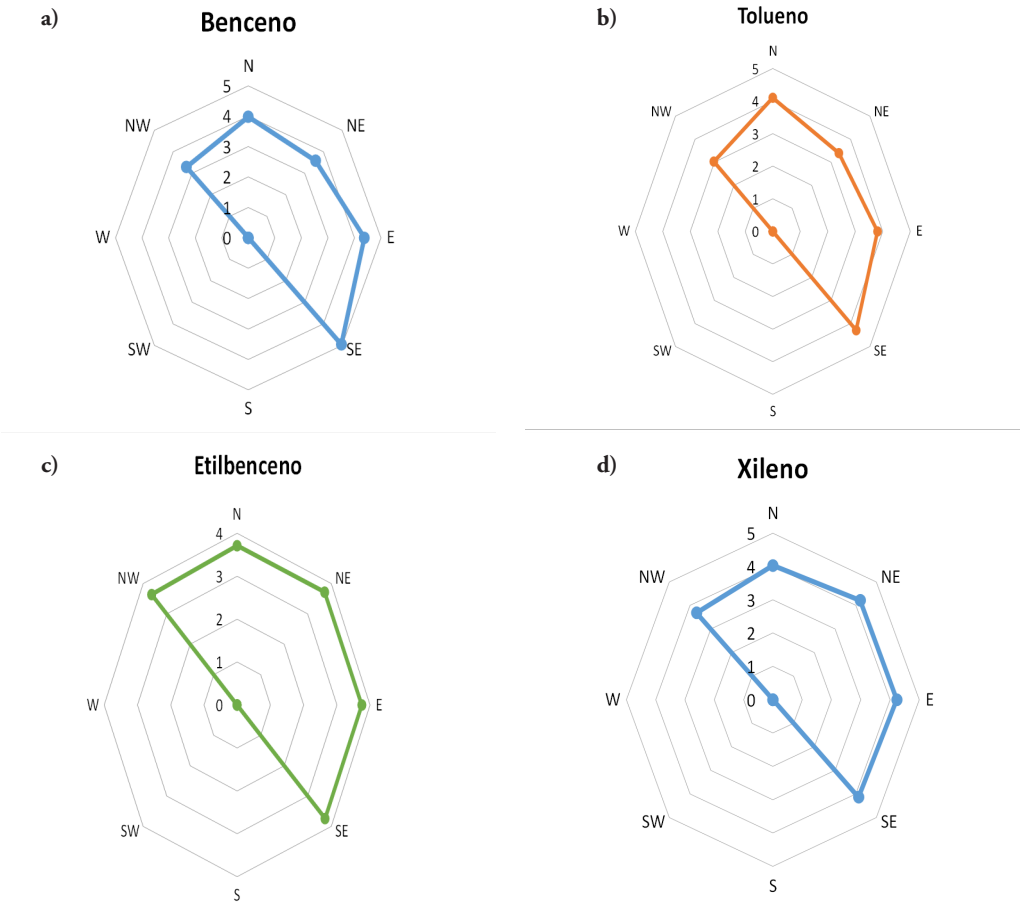


Figura 8. Rosas de viento vs concentración en el sitio de muestreo para (a) benceno, (b) tolueno, (c) etilbenceno y (d) xileno.

Tabla 10. Matriz de correlación de Pearson entre las concentraciones de BTEX y las variables meteorológicas para el sitio de estudio.							
Xileno	Temperatura	Presión (HPa)	Humedad	Xileno	Temperatura	Presión (HPa)	Humedad
Benceno	1						
Tolueno	0.978	1					
Etilbenceno	0.813	0.916	1				
Xileno	0.930	0.986	0.970	1			
Temperatura	0.748	0.870	0.995	0.940	1		
Presión (HPa)	0.443	0.247	-0.162	0.081	-0.263	1	
Humedad	-1.000	-0.974	-0.803	-0.923	-0.736	-0.459	1
Los valores en negrita son diferentes de 0 con un nivel de significancia alfa=0.05							

los factores 1 y 2, respectivamente. Agrupando dentro del Factor 1 a benceno, tolueno, etilbenceno, xileno, temperatura y humedad, y en el Factor 2 la presión atmosférica (tabla 12).

En la figura 9 se presenta la gráfica de biplot del análisis ACP. A partir de la Figura 9, se puede observar una significativa entre los compuestos BTEX y la temperatura; así como una correlación significativa inversa entre

Tabla 11. Resultados del análisis de componentes principales (ACP) para el sitio de muestreo.		
	F1	F2
Valor Propio	5.557	1.443
Variabilidad (%)	79.390	20.610
% Acumulado	79.390	100.000

Tabla 12. Correlaciones entre las variables y los factores.		
	F1	F2
Benceno	0.960	0.278
Tolueno	0.997	0.073
Etilbenceno	0.943	-0.333
Xileno	0.995	-0.095
Temperatura	0.903	-0.429
Presión	0.176	0.984
Humedad	-0.955	-0.295

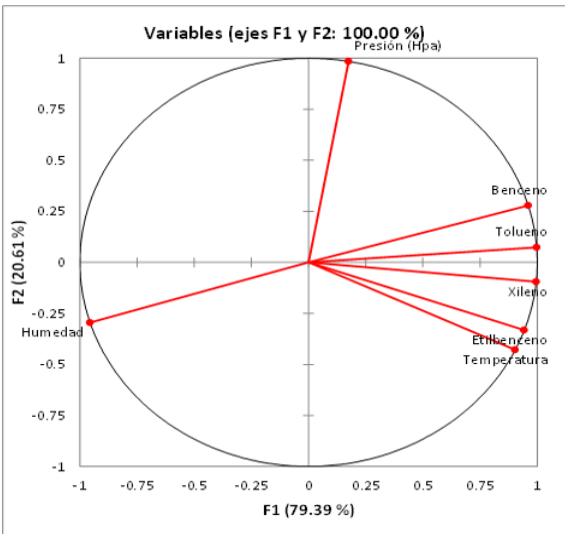


Figura 9. Gráfica biplot del ACP aplicado a las concentraciones de BTEX y variables meteorológicas en el sitio de muestreo.

los compuestos BTEX y la humedad; mientras que, en el caso de la presión atmosférica, no se observó ninguna correlación ni con los compuestos BTEX ni con el resto de las variables meteorológicas.

Mapeo

Las concentraciones de BTEX obtenidas se interpolaron mediante el método de Kriging para generar un nuevo conjunto de datos de concentración estimadas, que a su vez se graficaron en Surfer para generar las isolíneas de concentración. Las isolíneas se georeferenciaron para generar mapas de concentración para cada compuesto BTEX con la finalidad de discutir la distribución espacial de los compuestos BTEX.

En la figura 10 se muestra la distribución espacial de benceno, observándose que las

concentraciones de benceno tienden a ser más altas hacia el Noroeste de la zona de muestreo, es decir, hacia la zona de la Caleta. Por otro lado, en la figura 11, se presenta la distribución espacial de tolueno, observándose el mismo patrón espacial de benceno. La zona de la caleta incluye un malecón que constituye una de las únicas dos vialidades que conectan el extremo oriental de la isla con el extremo occidental, por lo que, a ciertas horas, dichas vías se encuentran congestionadas y con un alto aforo vehicular.

En la figura 12 se muestra la distribución espacial de etilbenceno, observándose que las concentraciones de benceno fueron más altas hacia el Noroeste de la zona de muestreo, es decir, hacia la zona de la Caleta. Por otro lado, en la figura 13, se presenta la distribución espacial de xileno, observándose el

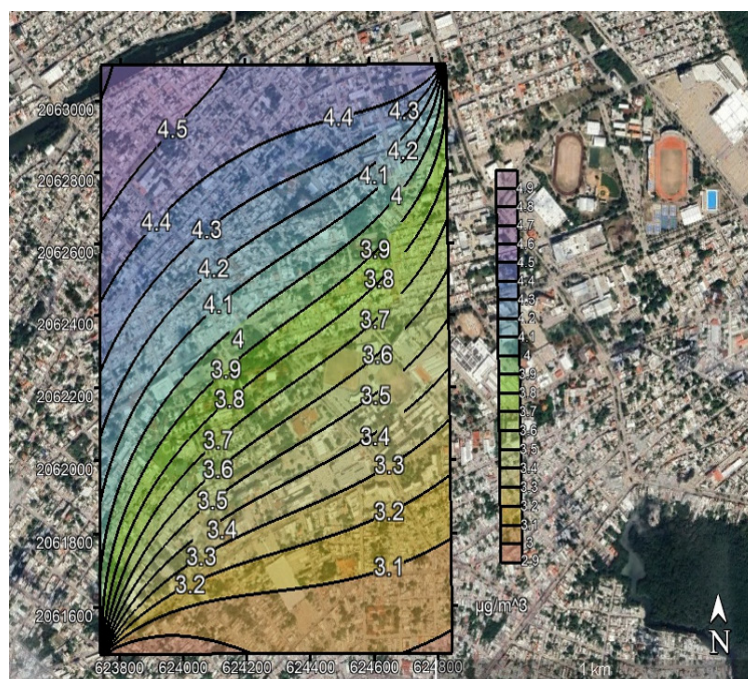


Figura 10. Mapa de isolíneas de concentración de benceno en el sitio de muestreo.

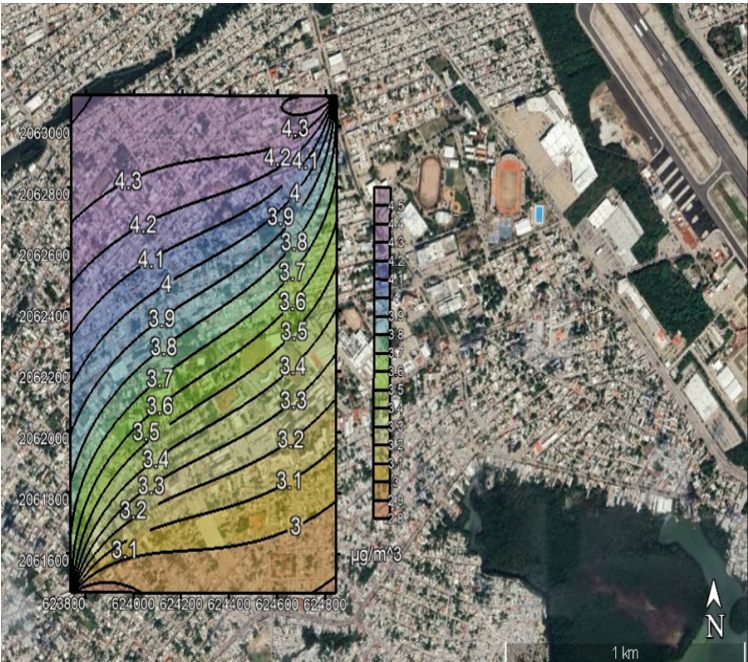


Figura 11. Mapa de isótopos de concentración de tolueno en el sitio de muestreo.

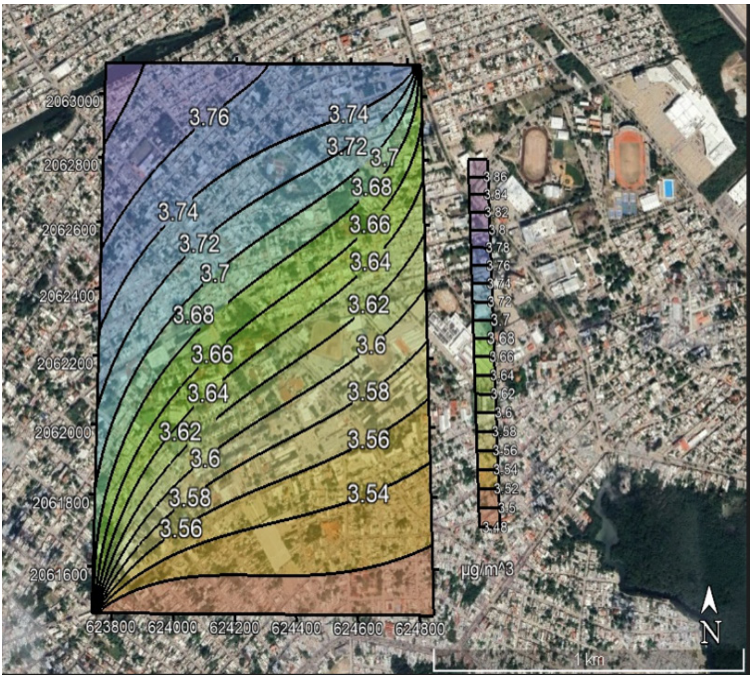


Figura 12. Mapa de isótopos de concentración de etilbenceno en el sitio de muestreo.

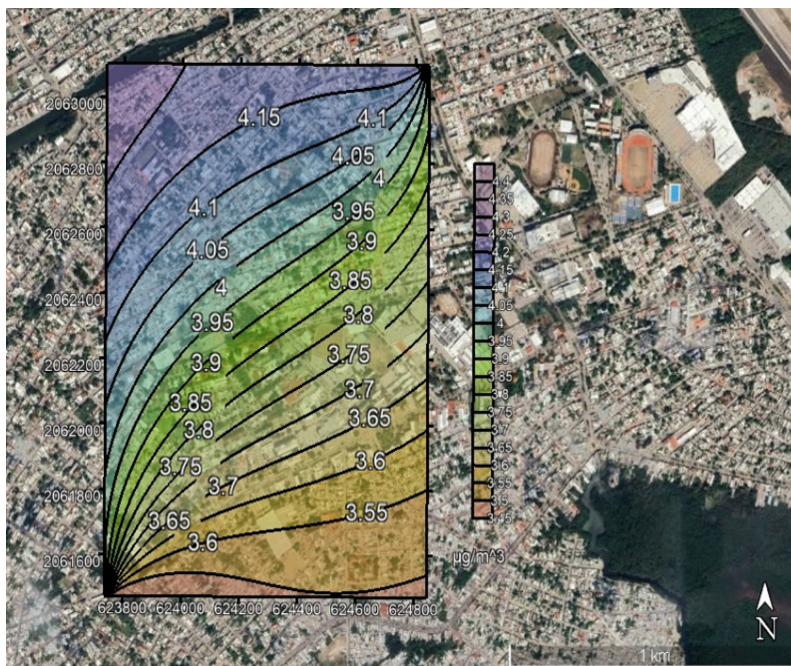


Figura 13. Mapa de isolíneas de concentración de xileno en el sitio de muestreo.

mismo patrón espacial de benceno, tolueno y etilbenceno. En la zona de la caleta, como ya se mencionó anteriormente, existe un malecón que constituye una de las únicas dos vialidades que conectan un extremo de la isla con el otro, por lo que a horas pico, dicha vialidades presentan un alto tráfico vehicular.

Razones B/T y X/E

Las razones B/T y X/E constituyen una herramienta útil para determinar el probable origen de los BTEX en un sitio dado. Así, la razón tolueno/benceno (B/T) 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. Por otro lado, en el caso de la razón xileno/etilbenceno (X/E), esta razón es usada para inferir la edad de las masas de aire, y permiten inferir si las emisiones son de tipo local y provienen de emisiones frescas, o bien, si son provenientes de masas de aire añejas es decir, de tipo regional y con un cierto historial de procesamiento fotoquímico. De este modo, valores por debajo de 4.4 en esta razón indican que las masas de aire son recientes y transportan emisiones frescas, por lo que su origen puede ser considerado como de tipo local (Keymeulen *et al.*, 2001). A partir de la tabla 13 se puede observar que, las razones B/T para los 3 horarios de muestreo (B1, B2 y B3) fueron cercanos a 1, que puede ser considerado como característico de sitios con alta influencia de

Tabla 13. Razones B/T obtenidas en el sitio de muestreo.

B/T		
B1	B2	B3
0.7113	0.9687	1.0282
0.9286	1.0208	0.8013
1.0567	1.0449	1.0392
1.0464	1.3400	1.4033
1.0681	1.1302	1.0073
1.0918	1.4406	0.9247
1.0988	1.1255	1.0314
1.4563	1.0977	1.0396
1.0270	1.0543	1.0881
1.1222	1.0628	1.0716
1.0607	1.1286	1.0435

emisiones vehiculares. Por lo tanto, se puede inferir que las emisiones de BTEX probablemente hayan tenido su origen en emisiones vehiculares e inclusive de la misma estación de servicio en donde se hizo el muestreo.

Por otro lado, a partir de la tabla 14 se puede observar que, las razones x/E para los 3 horarios de muestreo (B1, B2 y B3) también fueron cercanos a 1, indicando que se trata de masas de aire recientes que transportan emisiones frescas, por lo que el origen de los compuestos BTEX medidos puede ser considerado como de tipo local.

Las razones T/B son usadas para determinar la abundancia relativa entre fuentes vehiculares y no vehiculares, en este caso, las razones T/B para el sitio IMP fueron menores que 3, en un rango de 0.890 a 1.256 con un valor promedio de 1.075, lo que indica que las emisiones de BTEX provienen de fuentes vehiculares, ya que, dicho rango ha sido reportado en diversas áreas urbanas del mundo (figura 14).

Las razones x/E son usadas como un indicador de la edad fotoquímica de las masas de aire en el sitio de muestreo, esto se debe a las reacciones fotoquímicas de xileno y etilbenceno (donde xileno es más reactivo en comparación con el etilbenceno). En este estudio, la razón x/E para el sitio de muestreo fue menor que 3.8, en un rango de 1.024 a 1.196 con un valor promedio de 1.100, lo que indica que las emisiones fueron recientes y de origen local, ya que es un indicador de que se trata de masas de aire frescas (figura 15).

Evaluación de riesgo

Se calculó el índice de riesgo de cáncer como resultado de la exposición a benceno en el sitio de muestreo tanto para la población adulta como para la población infantil (figura 16). Los valores de riesgo de cáncer en el tiempo de vida (LTCR) para el sitio IMP fueron de 3×10^{-5} a 4.89×10^{-5} con un valor promedio de 3.92×10^{-5} para adultos y

Tabla 14. Razones X/E obtenidas en el sitio de muestreo.		
X/E		
B1	B2	B3
1.0740	1.1422	0.9797
1.0093	0.9706	1.0889
1.0199	1.0455	1.1818
1.0387	1.0458	1.1392
1.0432	1.0695	1.1401
1.0600	1.2528	1.1249
1.0327	1.2438	1.0931
1.1192	1.3774	1.0686
1.1179	1.1332	1.0126
1.1358	1.0203	1.1493
1.0651	1.1301	1.0978

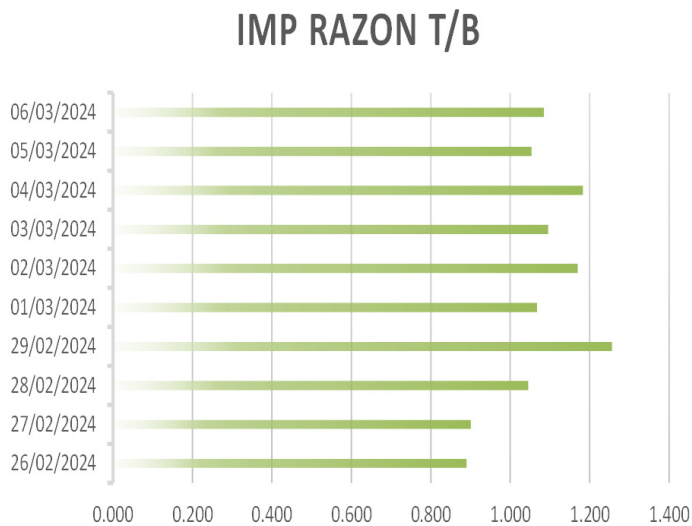


Figura 14. Razones B/T en el sitio de muestreo.

5.683×10^{-5} a 8.856×10^{-5} con un valor promedio de 7.436×10^{-5} para niños, se puede observar que, los promedios en ambos casos sobrepasan el valor de referencia propuesto por la US EPA (1×10^{-6}); siendo el riesgo

significativamente más elevado para la población infantil.

Se estimaron los índices de riesgo no carcinogénico para los 4 compuestos BTEX. El potencial global de efectos no carcinogénicos

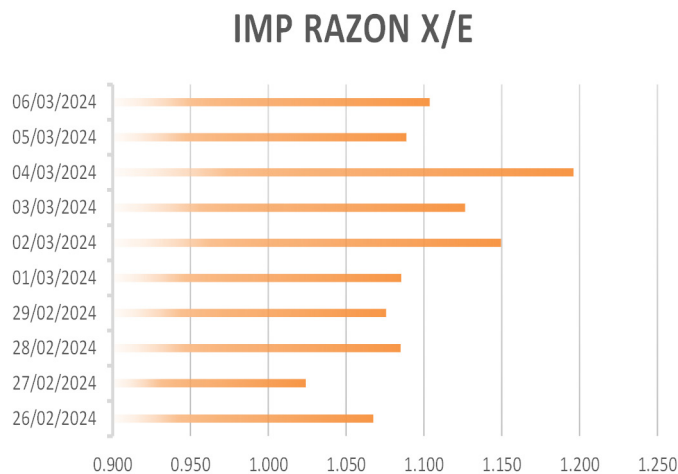


Figura 15. Razones X/E en el sitio de muestreo.

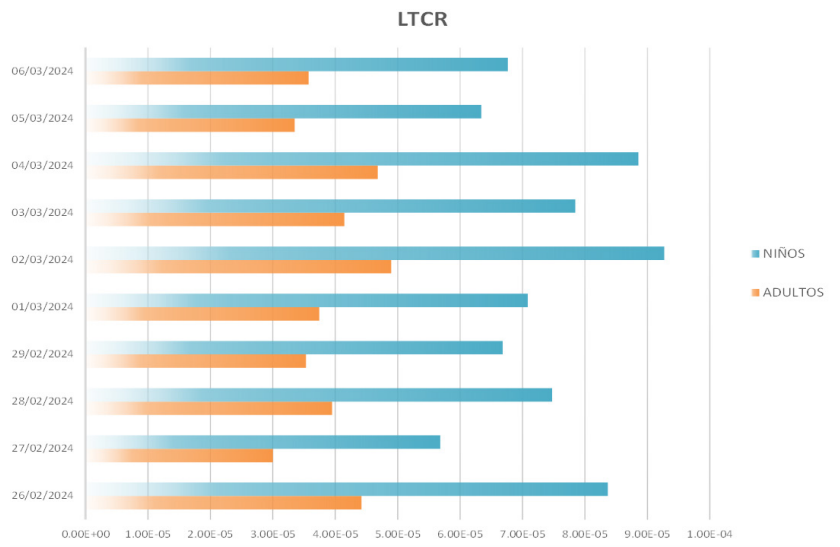


Figura 16. Riesgo de cáncer (LTCR) por exposición a benceno en el sitio de muestreo para la población adulta e infantil.

cos debido a la exposición de más de un químico fue determinado como un índice de riesgo HQ, donde un valor de $HQ < 1$ indica que la población no está expuesta a un riesgo significativo de contraer enfermedades dife-

rentes al cáncer (enfermedades respiratorias y cardiovasculares) como consecuencia de la exposición diaria a este tipo de compuestos. A partir de la figura 17 se puede observar que, los valores de HQ fueron en todos los



Figura 17. Riesgo de no cáncer (HQ) por exposición a BTEX para la población en el sitio de muestreo.

casos menores a la unidad, lo cual sugiere que, la población cercana a la zona de estudio, no presenta riesgo de padecer enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

Comparación con otros estudios

En la tabla 15 se presenta una comparación de los resultados obtenidos en el presente estudio con aquéllos reportados por otros autores en otras regiones del mundo.

Para el caso del Benceno, se puede observar que, los niveles obtenidos en el sitio de estudio fueron considerablemente más bajos que los reportados por Baimatova *et al.* (2016) en Kazajistán; Chaiklieng (2021) en Tailandia, Cerón *et al.* (2018) en Tijuana, Esteves *et al.* (2015) en Orizaba, y por Cerón *et al.* (2017) en Mérida. Sin embargo, fueron más altos que los hallados por Mainka y Kozielska (2016) en una guardería en Polonia, por

Tecer *et al.* (2017) en Turquía, por Moolla *et al.* (2015) en Sudáfrica, y por Cerón *et al.* (2020) en León.

Los niveles de Tolueno encontrados fueron más bajos que los reportados en otros estudios, y considerablemente más bajos que los reportados por Kerchich & Kerbach (2012) en Algeria, y por Chaiklieng (2021) en Tailandia. Por otro lado, los niveles de Etilbenceno obtenidos fueron comparables a los encontrados por Molla *et al.* (2015) en Sudáfrica, y más bajos que los reportados por otros autores. Finalmente, en el caso de xileno, las concentraciones encontradas fueron más bajas que las reportadas por otros autores, y significativamente más bajas que las encontradas por Chaiklieng (2021) en Tailandia y por Cerón *et al.* (2018) en Ensenada.

Tabla 15. Comparación de los resultados obtenidos con los reportados en otros estudios.					
Ubicación	B	T	E	X	Referencia
Guarderías en de Gliwice, Polonia ($\mu\text{g m}^{-3}$)	1.24	0.78	0.22	0.46	Mainka & Kozielska (2016)
Almaty, Kazajistán ($\mu\text{g m}^{-3}$)	53	57	11	14	Baimatova et al (2016)
Algiers, Algeria ($\mu\text{g m}^{-3}$)	16.7	40.5	6.8	10.74	Kerchich & Kerbach (2012)
Yalova, Turkia ($\mu\text{g m}^{-3}$)	2.6	11	1.32	3.8	Tecer et al (2017)
Johannesburgo, Sudafrica (ppb)	1.41	3.22	0.67	4.1	Moolla et al (2015)
Khon Kaen, Thailand ($\mu\text{g m}^{-3}$)	33.1	142.7	14.4	41.3	Chaiklieng (2021)
Ensenada, Baja California, México (ton año ⁻¹)	16.8	50.7	0.1	3.1	García et al (2015)
Tijuana, Baja California, México ($\mu\text{g m}^{-3}$)	32.4	13.28	7.02	17.16	Cerón et al (2018)
Leon, Guanajuato, México ($\mu\text{g m}^{-3}$)	1.73	11.85	11.86	3.31	Cerón et al (2020)
Orizaba, Veracruz, México ($\mu\text{g m}^{-3}$)	74.51	5.33	2.26	3.35	Esteves et al (2015)
Mérida, Yucatán, México ($\mu\text{g m}^{-3}$)	40.91	6.87	6.23	13.87	Cerón et al (2017)
Mérida, Yucatán, México ($\mu\text{g m}^{-3}$)	32.86	3.29	4.48	8.29	Cerón et al (2017)
IMP, Ciudad del Carmen, Campeche, México ($\mu\text{g m}^{-3}$)	4.30	4.03	3.73	4.11	Cerón et al (2024)

Conclusiones

Se evaluó la variabilidad temporal en los niveles de BTEX en un sitio aledaño a una gasolinera en Ciudad del Carmen, Campeche, durante la temporada de secas 2024. Las concentraciones de todos los BTEX fueron más elevadas durante el periodo de muestreo B2 que corresponde al horario de 12:00 a 13:00 h; sin embargo, al aplicar pruebas de hipótesis, se encontró que estas diferencias sólo fueron significativas para el caso del tolueno y xileno. Las concentraciones de BTEX encontradas en el presente estudio fueron en general más bajas que las reportadas por otros autores en otras regiones del mundo.

A partir de las gráficas de telaraña para evaluar la influencia de la meteorología de superficie sobre los niveles de BTEX medidos, se encontró que, la tendencia fue la misma para todos los BTEX, con las concentraciones más elevadas cuando el viento tuvo una

componente del SE, es decir, cuando el viento sopló del Suroeste hacia el Noroeste. Aplicando herramientas geoestadísticas se evaluó la variabilidad espacial de los compuestos BTEX en la zona de estudio, encontrándose en todos los casos que, los niveles de compuestos BTEX tienden a ser más altas hacia el noroeste de la zona de muestreo, es decir, hacia la zona de la Caleta. La zona de la caleta incluye un malecón que constituye una de las únicas dos vialidades que conectan el extremo oriental de la isla con el extremo occidental, por lo que, a ciertas horas, dichas vías se encuentran congestionadas y con un alto aforo vehicular. Sin embargo, para determinar si las fuentes vehiculares efectivamente tuvieron o no un impacto significativo en cuanto a la emisión de compuestos BTEX, se estimaron las razones B/T y X/E. Las razones B/T para los 3 horarios de muestreo

(B1, B2 y B3) fueron cercanas a 1, lo que puede ser considerado como característico de sitios con alta influencia de emisiones vehiculares. Por lo tanto, se puede inferir que las emisiones de BTEX probablemente hayan tenido su origen en emisiones vehiculares e inclusive de la misma estación de servicio en donde se hizo el muestreo.

Por otro lado, puesto que las razones x/E son usadas como un indicador de la edad fotoquímica de las masas de aire en el sitio de muestreo, en este estudio, la razón x/E para el sitio de muestreo fue menor que 3.8 en todos los casos, en un rango de 1.024 a 1.196 con un valor promedio de 1.100, lo que indica que las emisiones fueron recientes y de origen local, indicando que se trata de masas de aire frescas. Finalmente, el índice de riesgo de cáncer por exposición a benceno sobrepasó el valor de referencia propuesto por la US EPA ($LT_{CR} 1 \times 10^{-6}$); sugi-

riendo un riesgo significativo, y siendo aún más elevado para la población infantil. El potencial global de efectos no carcinogénicos debido a la exposición de BTEX fue determinado como un índice de riesgo HQ. En todos los casos se obtuvo un valor de $HQ < 1$ indicando que la población no está expuesta a un riesgo significativo de contraer enfermedades diferentes al cáncer (enfermedades respiratorias y cardiovasculares) como consecuencia de la exposición diaria a los niveles de BTEX medidos en la zona de estudio. Sin embargo, es necesario realizar más estudios en la ciudad incluyendo otras temporadas climáticas y un mayor número de sitios de muestreo (estaciones de servicio) para poder obtener conclusiones más precisas con respecto al riesgo que representan este tipo de emisiones, sobretudo en el caso del benceno con respecto a la población infantil.

Literatura citada

- ATSDR. (2004). Interaction profile for Benzene, toluene, Ethylbenzene, and Xylenes (BTEX) p. 154. Agency for Toxic substances and disease Registry. Retrieved septiembre 27, 2029, from <https://www.atsdr.cdc.gov/interactionprofiles/ip-btex/ip05.pdf>
- Baimatova, N., Kenessov, B., Koziel, J. A., Carlson, L., Bektassov, M., & Demyanenko, O. (2016, July 01). Simple and accurate quantification of BTEX in ambient air by SPME and GC-MS. Elsevier.
- Bloemen, T. H., & Burn, J. (1993). Chemistry and analysis of volatile organic compounds in the environment. Netherlands: Springer science + Business Media B.V.
- Campos-Candel, A., Llobat-Estellés, M., & Mauri-Aucejo, A. R. (2007). Desorption of BTEX from activated charcoal using accelerated solvent extraction: evaluation of occupational exposures. *Anal. Bioanal. Chem.*, 387, 1517–1523.
- Cerón, J. G., Cerón, R. M., Guarnaccia, C., Lara, R., Rangel, M., Rodríguez, A., . . . Salvaño, Y. A. (2018). Characterization and sources of aromatic hydrocarbons (BTEX) in an urban site of Tijuana, Baja California, Mexico. AIP Conf. Proc. (pp. 020020-1-020020-6).
- Cerón, J. G., Cerón, R. M., Martínez, S., D.W. Kahl, J., Guarnaccia, C., Lara, R., . . . Li-

- cona, 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, 165.
- Chaiklieng, S. (2021). Risk assessment of workers' exposure to BTEX and hazardous area classification at gasoline stations. *PLoS ONE*, 16(4).
- Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios. (2017, diciembre 31). Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de Calidad del Aire Ambiente. Retrieved from <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/4-normas-oficiales-mexicanas-nom-de-calidad-del-aire-ambiente>
- DOF. (2019, noviembre 20). NOM-172-SE-MARNAT-2019. Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud. SE-MARNAT. Retrieved from https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5579387&fecha=20/11/2019#gsc.tab=0
- Estéves, D., Dimas, E., Casanova, M. T., Cerón, J. G., Cerón, R. M., Rustrián, E., . . . Cima, C. (2015). Niveles de BTEX en aire ambiente y niveles de riesgo carcinogénico de benceno en un sitio urbano en el centro de Veracruz. 2º Congreso Nacional AMICA 2015. Retrieved from <http://www.amica.com.mx/issn/archivos/121.pdf>
- FAO & PNUMA. (2022). Evaluación mundial de la contaminación del suelo. Retrieved from <https://www.fao.org/3/cb4827es/cb4827es.pdf>
- Finlayson, B. J., & Pitts, J. N. (1993). Atmospheric chemistry of tropospheric ozone formation: scientific and regulatory implications. *Journal of Air and Waste Management Association*, 43, 1091-1100.
- García, M., Arellano, E., Walter, L., Espejel, I., Villada, M., Aceves, P., . . . Eaton, R. (2015). Emisión de BTEX por las gasolineras, proximidad geográfica y síntomas neurológicos en residentes de Ensenada, Baja California, México. *Ciencias Naturales y Exactas Handbook T-II: Congreso Interdisciplinario de Cuerpos Académicos* (pp. 124-139). Ensenada, Baja California, México: ISBN 978-607-8324-18-7.
- IARC. (2018). IARC Monographs Volume 120: Benzene. Francia: IARC & OMS. Retrieved from <https://www.iarc.who.int/news-events/iarc-monographs-volume-120-benzene/>
- IHME. (2019). GBD COMPARE, 2023. (University of Washington) Retrieved from <https://vizhub.healthdata.org/gbd-compare/#>
- IHME. (2019). Global Burden of Disease (GBD). Retrieved septiembre 26, 2023, from <https://www.healthdata.org/research-analysis/gbd>
- INECC. (2019). Calidad del aire. Retrieved from <https://cambioclimatico.gob.mx/estadosymunicipios/Aire.html>
- INEGI. (2020). Estado de Campeche. Retrieved from <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/camp>
- INSHT. (1995). Determinación de hidrocarburos aromáticos (benceno, tolueno, etilbenceno, p-xileno, 1,2,4-trimetilbenceno) en aire - Método de adsorción en carbón activo / Cromatografía de gases. MTA/MA-030/A92. España: INSHT. Retrieved from https://www.insst.es/documents/94886/359043/MA_030_A92.pdf/ac88773d-81a9-4408-854d-d2451d16a2c7
- Kerchich, Y., & Kerbach, R. (2012). Measurement of BTEX (benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene) levels at urban and semi-rural areas of Algiers City using passive air samplers. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 62(12), 1370-1379.
- Lan, T. T., & Minh, P. A. (2013). BTEX pollution caused by motorcycles in the megacity of HoChiMinh. *Journal of Environmental Sciences*, 25(2), 348-356.
- Li, L., & Li, H. (2014). Pollution characteristics and health risk assessment of benzene homologues in ambient air in the northeastern

- urban area of Beijing, China. *J. Environ. Sci.*, 214-223.
- Mainka, A., & Kozielska, B. (2016). Assessment of the BTEX concentrations and health risk in urban nursery schools in Gliwice, Poland. *AIMS Environmental Science*, 3(4), 858-870.
- Moolla, R., Curtis, C. J., & Knight, J. (2015). Occupational Exposure of Diesel Station Workers to BTEX Compounds at a Bus Depot. 12, 4101-4115.
- NIOSH. (1973). Occupational exposure to toluene. National Institute for Occupational Safety and Health. Retrieved from https://stacks.cdc.gov/view/cdc/19331/cdc_19331_DS1.pdf
- NIOSH. (1976). Revised recommendation for an occupational exposure standard for benzene. Cincinnati: National Institute for Occupational Safety and Health. Retrieved from https://stacks.cdc.gov/view/cdc/19373/cdc_19373_DS1.pdf
- NIOSH. (2014, December 04). Immediately Dangerous to Life or Health Concentrations (IDLH) Values Xylene (o-, m-, p-Isomers). Retrieved from <https://www.cdc.gov/niosh/idlh/95476.html>
- NOAA. (2024). HYSPLIT Model. NOAA. Retrieved from <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>
- ONU. (2022). La regulación de la calidad del aire, resumen ejecutivo. ONU. Retrieved from chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/36692/GAAPL_ES_SP.pdf
- OSHA. (2021). Occupational Chemical Database: Ethyl Benzene. OSHA. Retrieved from <https://www.osha.gov/chemicaldata/13>
- PAHO & WHO. (2012, junio 12). IARC: Diesel engine exhaust carcinogenic. Retrieved from https://www3.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=6903:2012-iarc-diesel-engine-exhaust-carcinogenic&Itemid=0&lang=en#gsc.tab=0
- Rodrigues, B., Nascimento, R. F., Barroso, J., Giardini, I., Baptista, P. V., Campos, E., . . . Sarpa, M. (2020). Analysis of Benzene Exposure in Gas Station Workers Using Trans,Trans-Muconic Acid. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 17, 5295.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales . (2023, marzo 17). Programas de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire ProAire. Retrieved from <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/programas-de-gestion-para-mejorar-la-calidad-del-aire>
- SEMARNAT . (2018). Programa de gestión para mejorar la calidad del aire ambiente del estado de Campeche. San Francisco de Campeche: SEMARNAT.
- SINAICA. (2023). Datos crudos de calidad del aire y de variables meteorológicas en tiempo real. Retrieved from Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire, SINAICA: <https://sinaica.inecc.gob.mx/#:-:text=Sistema%20de%20Monitoreo%20de%20la,en%20una%20zona%20o%20regi%C3%B3n>.
- State of global air. (2019). Global Health Impacts of Air Pollution. (Charles River Web) Retrieved septiembre 25, 2023, from <https://www.stateofglobalair.org/health/global>
- Tecer, L. H., Tagil, S., Ulukaya, O., & Ficici, M. (2017). Spatial distribution of BTEX and inorganic pollutants during summer season in Yalova Turkey. *Ecol. Chem. Eng.*, 24(4), 565-581.
- The World Bank. (2023, septiembre 19). The World Bank. Retrieved septiembre 25, 2023, from Pollution: <https://www.worldbank.org/en/topic/pollution>
- U.S. Environmental Protection Agency. (1987). Assessment of Health Risks to Garment Workers and Certain Home Residents from Exposure to Formaldehyde. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Pesticides and Toxic Substances.

- U.S. Environmental Protection Agency. (1991). Indoor Air Quality: Sick Building. U.S. Environmental Protection Agency, Indoor Air Group. NC: Research Triangle Park.
- USEPA. (2012). Benzene. Retrieved from <https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-09/documents/benzene.pdf>
- WHO. (2022, Diciembre 19). Ambient (outdoor) air pollution. Retrieved from [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health?gclid=CjwKCAjws9ipBhB1EiwAccEi1HegZU8m98N6UqdLEfmCRQ4DPAITClfDyUVoHrIc_6HxLURbGKJEghoCTckQAvD_BwE](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health?gclid=CjwKCAjws9ipBhB1EiwAccEi1HegZU8m98N6UqdLEfmCRQ4DPAITClfDyUVoHrIc_6HxLURbGKJEghoCTckQAvD_BwE)
- WHO. (2023). Air Pollution. Retrieved from World Health Organization: https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1
- Yalcin, E., Tecer, L. H., Yurdakul, S., & Tuncel, G. (2020). Potential sources and measured concentrations of VOCs in Balikesir ambient atmosphere. *Atmósfera*, 33(3), 269-284.
- Zhang, L., Mu, Y., Liu, J., & Mellouki, A. (2012). Levels, sources and health risks of carbonyls and BTEX in the ambient air of Beijing, China. Elsevier, 124-130.

