

► BTEX in water: advances and perspectives for its treatment



# EN AGUA:

avances y perspectivas para su tratamiento

RESUMEN

En los últimos años se ha tenido un particular interés en el tratamiento de agua contaminada con hidrocarburos y en específico, por una mezcla llamada BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno), un contaminante que se encuentra comúnmente en el agua, ya sea por descargas o derrames asociados a actividades de la industria petroquímica. Estos contaminantes son resistentes a los tratamientos convencionales de agua, lo que incrementa el riesgo de utilizar los cuerpos de agua contaminados para uso y consumo humano. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica considera al BTEX como contaminantes prioritarios debido a su toxicidad e impone límites máximos permisibles muy estrictos al igual que los establecidos por la normatividad mexicana. En este artículo se realiza una revisión de las fuentes comunes de BTEX en agua y se presenta un comparativo de la normatividad internacional pertinente, así como un análisis de los tratamientos empleados en la actualidad resaltando la aplicación de la nanotecnología para su optimización.

**PALABRAS CLAVE:**  
BTEX · Tratamiento de agua · Nanotecnología

**ABSTRACT**  
In recent years there has been an interest in the treatment of water contaminated with hydrocarbons and specifically by a mixture called BTEX (benzene, toluene, ethylbenzene and xylene), which are pollutants that are common-

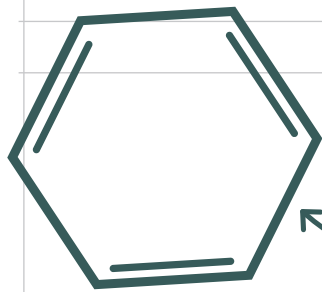


LA AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL DE LOS ESTADOS UNIDOS DE NORTEAMÉRICA CONSIDERA AL BTEX COMO CONTAMINANTES PRIORITARIOS DEBIDO A SU TOXICIDAD.

ly found in water either by discharges or spills associated with activities of the petrochemical industry. These pollutants are resistant to conventional water treatments, which increases the risk of using these contaminated water bodies for human use and consumption. The Environmental Protection Agency of the United States of America considers BTEX as priority pollutants due to its toxicity and imposes very strict maximum permissible limits, as well as those established by Mexican regulations. This article is based on a review of the common sources of BTEX in water and presents a comparison of the relevant international regulations, as well as an analysis of the treatments currently used, highlighting the application of nanotechnology for its optimization.

**KEY WORDS:**  
BTEX · Water treatment · Nanotechnology

Por: Ana Karen Cordova Estrada · René Alejandro Lara Díaz · Felipe Cordova Lozano



Benceno

**INTRODUCCIÓN**

Las actividades económicas y sociales de la población y su propia sobrevivencia dependen de la disponibilidad y calidad del capital natural, constituido por el suelo, aire, agua y los ecosistemas. La calidad, disponibilidad y condiciones de acceso a estos recursos influyen en la competitividad y productividad de los sectores que los utilizan, cuyo desempeño impacta, a su vez, cualitativa y cuantitativamente en éstos (PROMARNAT, 2013). El crecimiento de la actividad industrial en las últimas décadas ha contribuido en gran medida a la contaminación del medio ambiente con metales pesados, sustancias orgánicas e hidrocarburos, los cuales representan una amenaza para la salud pública aun cuando ocurren en bajas concentraciones (Belayachi *et al.*, 2015).

Los hidrocarburos son compuestos de carbono e hidrógeno que se han convertido en una importante fuente de energía en este siglo. Su uso constante y el crecimiento poblacional e industrial han aumentado la amenaza al medio ambiente, y la contaminación por éstos tiene implicaciones de gran alcance, tanto para los ecosistemas terrestres y acuáticos como para la atmósfera. Esta contaminación ha sido generada por derrames en los océanos, fugas en las tuberías de transporte y actividades de exploración, producción, refinación, transporte y almacenamiento de hidrocarburos, los cuales amenazan la calidad de vida de los ecosistemas y la población (Banerjee *et al.*, 2016).

**CADA AÑO, ALREDEDOR DE 35 millones DE BARRILES DE PETRÓLEO SON TRANSPORTADOS EN TODO EL MUNDO A TRAVÉS DE LOS OCÉANOS, LO QUE HACE AL MEDIO ACUÁTICO VULNERABLE A LA CONTAMINACIÓN.**

...ción, producción, refinación, transporte y almacenamiento de hidrocarburos, los cuales amenazan la calidad de vida de los ecosistemas y la población (Banerjee *et al.*, 2016).

Cada año, alrededor de 35 millones de barriles de petróleo son transportados en todo el mundo a través de los océanos, lo que hace al medio acuático vulnerable a la contaminación (Macaulay, 2015). En la figura 1, se reporta el número de eventos causados por fugas y derrames de hidrocarburos en el país para el periodo 2007 a 2017 por Petróleos Mexicanos (PEMEX), donde se muestra que el 2007 fue el año con mayor número de eventos, así como el incremento sustancial a casi un evento por día en 2017, exentando los eventos ocurridos por tomas clandestinas (PEMEX, 2017a). Otra preocupación

es la contaminación del suelo por hidrocarburos, debido a que provoca la contaminación del agua subterránea por infiltraciones (Thapa, Kumar y Ghimire, 2012). Tales incidentes de contaminación, tanto en el suelo como en el agua, se han vuelto muy frecuentes actualmente.

Alrededor del mundo, la contaminación por la industria petroquímica ha causado efectos adversos en los ecosistemas. Por ejemplo, el derrame de petróleo ocurrido en 2010 en el Mar Arábigo, cerca de la costa de Mumbai, India, dejó más de 2 km<sup>2</sup> de vastas áreas de mar contaminado (Banerjee *et al.*, 2016). En 2014, en el río Sela en Sunderbans (Bangladesh), se derramaron 350 toneladas de petróleo por más de 70 km<sup>2</sup>, amenazando el bosque de manglares de Sunderbans (Banerjee *et al.*, 2016).

En México, quienes realizan actividades industriales, comerciales o de servicios, consideradas altamente riesgosas, presentan un estudio de riesgo ambiental (ERA), cuyo objetivo es «evaluar los riesgos del manejo de materiales peligrosos, anticipando la posibilidad de liberaciones accidentales de sustancias químicas peligrosas, de manera tal que éstas puedan prevenirse o mitigarse». Para el periodo comprendido entre 1992 y 2015, el sector que ingre-

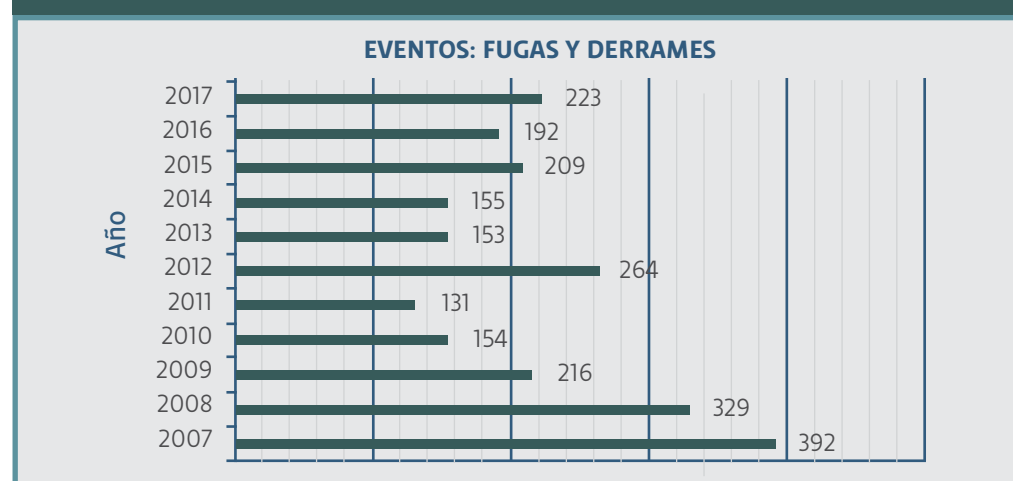
só el mayor número de ERAs fue el petrolero y sus derivados (2,948 estudios; 28.4% del total de ERAs presentadas). La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en 2016 reportó que hubo 4,078 sitios contaminados por emergencias ambientales, de este total, PEMEX tuvo el mayor porcentaje de responsabilidad con 2,743 sitios (67.3%), seguido de los transportistas (25.5%). La misma SEMARNAT reportó los contaminantes involucrados en estas emergencias ambientales para el periodo 2008-2015, donde los hidrocarburos ocupan el mayor porcentaje (30%), seguidos de la gasolina (27%), siendo el combustóleo el de menor impacto (4%) (SEMARNAT, 2016). En la Figura 2, se observa que tan sólo entre los hidrocarburos y la gasolina se obtiene el mayor porcentaje de contaminantes involucrados (57%).

Debido a los derrames de hidrocarburos sufridos en los últimos años, se ha generado una preocupación para su eliminación o tratamiento en el agua. Los hidrocarburos derramados en el medio acuático están sujetos a muchos procesos que afectan su transporte, destino e impacto al medio ambiente tales como la fotólisis, oxidación, partición, biodegradación y adsorción, entre otros (Saeed y Al-Mutairi, 1999).



**EN MÉXICO, EXISTE UNA AMPLIA VARIEDAD DE INDUSTRIAS QUE UTILIZAN LOS HIDROCARBUROS AROMÁTICOS COMO MATERIA PRIMA Y SE ESTIMA QUE MÁS DEL 90% DE LOS DESECHOS LÍQUIDOS INDUSTRIALES QUE SE GENERAN SE VIERTEN DIRECTAMENTE AL SISTEMA DE DRENAJE SIN TRATAMIENTO PREVIO.**

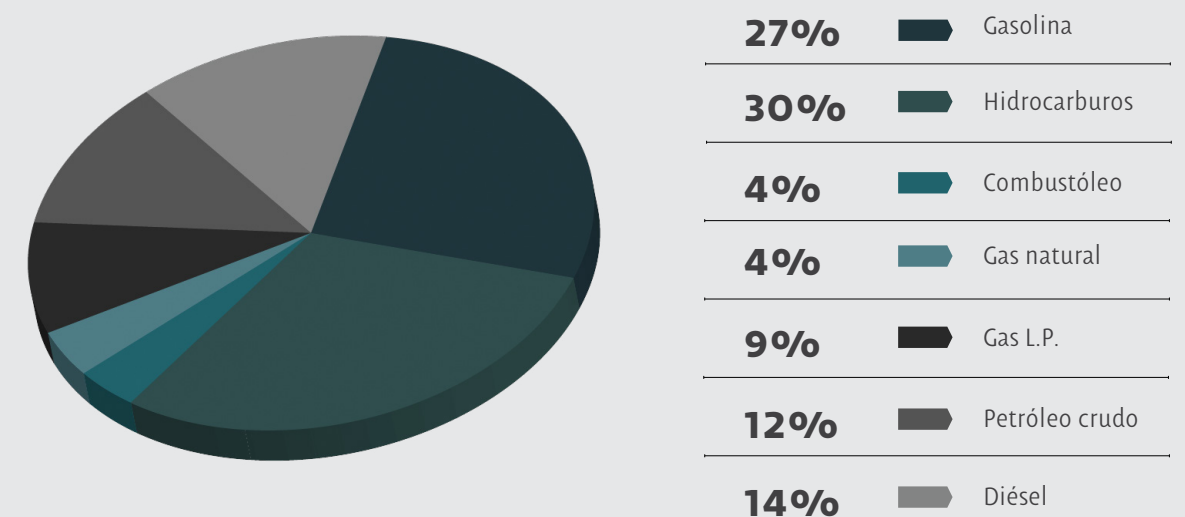
**Figura 1. Número de fugas y derrames de hidrocarburos ocurridos en México durante el período 2007-2017.**



Elaboración propia con datos de PEMEX 2017a.

**LOS HIDROCARBUROS SON COMPUESTOS DE CARBONO E HIDRÓGENO QUE SE HAN CONVERTIDO EN UNA IMPORTANTE FUENTE DE ENERGÍA EN ESTE SIGLO.**

**Figura 2. Contaminantes involucrados en emergencias ambientales entre 2008-2015 en México (SEMARNAT, 2016).**



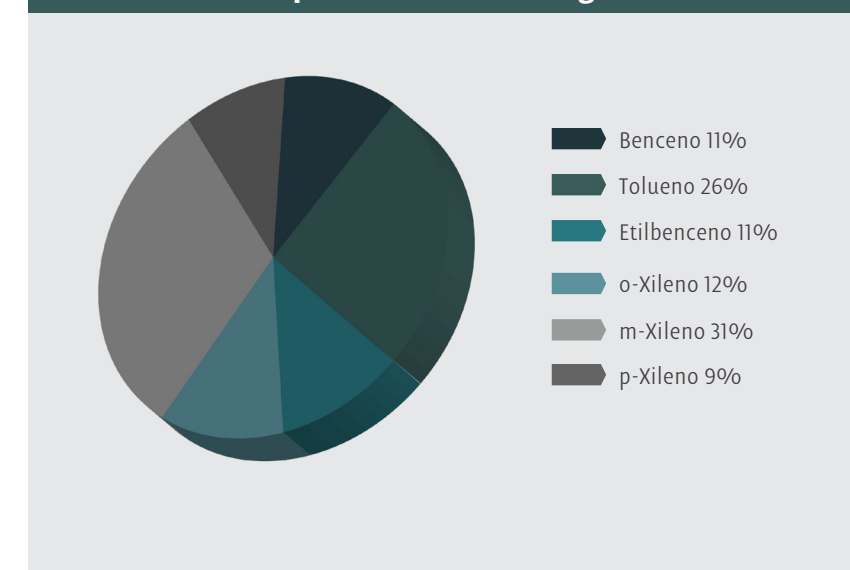


**EL BENCENO ES CONSIDERADO COMO EL COMPUESTO MÁS PELIGROSO DE LA MEZCLA BTEX, Y ESTÁ CATALOGADO COMO CARCINÓGENO Y GENOTÓXICO DE CATEGORÍA 1.**

ron las aguas subterráneas. En las muestras de agua tomadas se encontraron BTEX en concentraciones que excedían los límites máximos permisibles establecidos por la US EPA en un 90% para benceno, 30% para tolueno, 2% para etilbenceno y 8% para xilenos (Gross *et al.*, 2013). En Bolivia, González-Alonso *et al.* (2010), analizaron la calidad de 42 cuerpos de agua cercanos a campos petrolíferos y hallaron BTEX en concentraciones por arriba de los límites máximos permitidos por la normativa boliviana. Esto los llevó a observar que los cuerpos de agua ubicados en un radio de 30 km alrededor de campos de extracción de petróleo padecen de contaminación por BTEX.

En México, existe una amplia variedad de industrias que utilizan los hidrocarburos aromáticos como materia prima y se estima que más del 90% de los desechos líquidos industriales que se generan se vierten directamente al sistema de drenaje sin tratamiento previo (Soto *et al.*, 2000).

**Figura 3. Porcentaje (peso/peso) de los componentes BTEX en la gasolina.**



Elaboración con datos de Mitra y Roy (2011).



**LOS COMPUESTOS BTEX ESTÁN AMPLIAMENTE DISTRIBUIDOS EN EL MEDIO AMBIENTE DEBIDO A PROCESOS NATURALES Y SINTÉTICOS.**

alta, por ejemplo, para benceno se observa un valor de 1780 g/cm<sup>3</sup>, lo que indica que se solubiliza rápidamente en agua y sus valores del coeficiente de partición octanol-agua ( $K_{ow}$ ) son bajos; lo que muestra que estos compuestos químicos, debido a sus propiedades fisicoquímicas, tienden a disolverse en la fase acuosa o evaporarse dado su naturaleza hidrófila. Estas propiedades les permiten transportarse a largas distancias o adsorberse en el suelo alcanzando las aguas subterráneas. Los BTEX representan hasta el 80% del total de las emisiones de los compuestos volátiles (COV) en plantas petroquímicas (Fatehifar *et al.*, 2008) y hasta el 59% (peso/peso) de los contaminantes de la gasolina, donde el 31% corresponde al m-xileno, seguido del tolueno (26%); siendo los otros elementos menos significativos (ver figura 3).

**• Reportes de BTEX en agua**

Con más frecuencia se han detectado concentraciones relevantes de BTEX alrededor del mundo (Daifullah y Girgis, 2003). Tal es el caso en el condado de Weld, Colorado, donde los operadores de la Comisión de Conservación de Petróleo y Gas de Colorado (COGCC, por sus siglas en inglés) reportaron en 2010 y 2011, 77 derrames superficiales que impacta-

potable, cuyo consumo incrementa el riesgo de padecer enfermedades crónicas como el cáncer cuando sus concentraciones exceden los límites máximos permisibles (LMP) (Mehlman, 1992; Zhang *et al.*, 2012).

Esta revisión muestra la situación actual del BTEX como contaminante alrededor del mundo, tomando en cuenta su normativa y los trabajos que se han realizado en los últimos años para su eliminación del medio ambiente, así como la migración a las nuevas tecnologías como futuras oportunidades para su aplicación.

**• Propiedades del BTEX, toxicidad y su presencia en agua**

Los BTEX son compuestos orgánicos volátiles formados por un anillo monoaromático que, debido a su polaridad y características muy solubles, son contaminantes del agua, suelo y aire. Cantidades significativas de estos contaminantes entran al agua durante la extracción y refinación del petróleo y derivados empleados para la producción de pinturas, adhesivos, tintas y caucho, entre muchos otros (Castillo *et al.*, 1998). La tabla 1 resume las propiedades físicas y químicas relevantes del BTEX a una temperatura de 25°C, la solubilidad del BTEX en agua se puede observar que es relativamente

**Tabla 1. Propiedades físicas y químicas de los compuestos BTEX a 25°C**

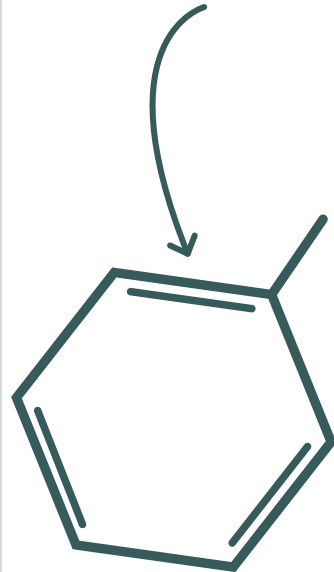
Compuesto	Fórmula	Estructura	Masa molecular M (g/mol)	Solubilidad S (g/cm <sup>3</sup> )	Presión de vapor P (Pa)	Log K <sup>ow</sup>
Benceno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>		78.1	1780	12700	2.13
Tolueno	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>		92.1	515	3800	2.69
Etilbenceno	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>		106.2	160	1270	3.15
Xilenos	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>		106.2	185	1170	3.15

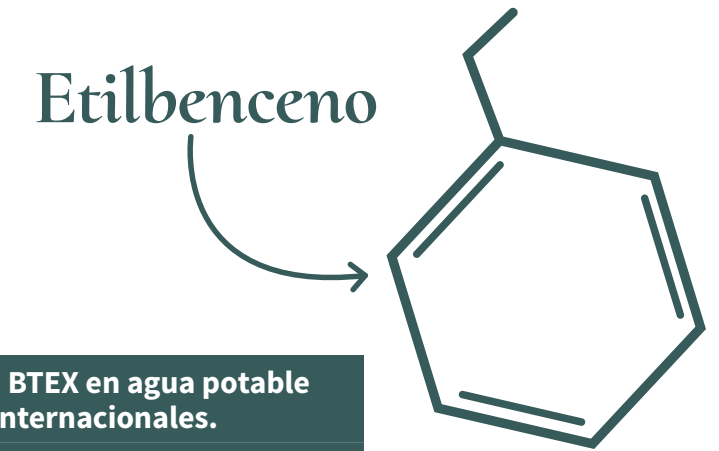
Elaboración con información de Mitra y Roy (2011); Kharisov, *et al.* (2014); Chesnaux (2008).

Saeed y Al-Mutairi (1999) estudiaron la composición química de la fracción soluble en agua de mar de la gasolina regular y de alto octanaje, y encontraron que los compuestos aromáticos, en particular el benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX) predominan en la fracción disuelta de los compuestos orgánicos volátiles estudiados (COV). De acuerdo a estos autores, cuando la gasolina está en contacto con el agua, la fracción BTEX representa hasta el 88% de los componentes de la gasolina que se encuentran solubles en agua.

Los BTEX es –entonces– una mezcla de compuestos monoaromáticos y contaminantes provenientes de derrames de gasolinas, tanques de almacenamiento con fugas, tuberías de transferencia, así como por descargas de efluentes industriales, representando una amenaza ambiental cuando se liberan al aire, suelo y cuerpos de agua superficiales y subterráneos (Aivalioti *et al.*, 2012; Fayemiwo *et al.*, 2017). Estos compuestos se han encontrado con mayor frecuencia en el agua, en una variedad de fuentes como: en los desechos de las industrias petroquímicas, desechos domésticos, gasolineras, así como en plumas de agua subterránea próximas a derrames (El-Naas *et al.*, 2014). En consecuencia, los BTEX se han identificado en agua

Tolueno





**Tabla 2. Límites máximos permisibles para BTEX en agua potable por distintas agencias regulatorias internacionales.**

Agencias regulatorias	Parámetros (ppm)	Benceno (ppm)	Tolueno (ppm)	Etilbenceno (ppm)	Xilenos (ppm)
ADWG (2011)		0.001	0.025	0.003	0.02
OMS (2001)		0.01	0.7	0.3	0.5
US EPA (1994)		0.005	1.0	0.7	10.0
MODIFICACIÓN-NOM-127-SSA1-1994 (2000)		0.01	0.7	0.3	0.5

(NHMRC, 2011; WHO, 2011; US EPA, 1994; MODIFICACIÓN-NOM-127-SSA1-1994).

nos; generando en total 270 mil Tm de BTEX (PEMEX, 2017c). En un estudio publicado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), en Salamanca, Guanajuato, se encontró que las concentraciones en aire a las que se expone a la sociedad en un diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 micrómetros de industrias (que usan BTEX) se encontraron valores de 0.0011 partes por mil millones en volumen (ppbv) para benceno y 0.0068 ppbv para tolueno. Por lo que los autores concluyen que el compuesto benceno, aun a bajas concentraciones, es cancerígeno, por lo que implica un riesgo a la sociedad (INECC, 2017).

Con base en lo anterior, resulta necesario identificar, evaluar y controlar la exposición a estos agentes tóxicos, determinando primeramente su concentración en el lugar de trabajo, así como establecer los criterios sanitarios para proteger la salud de la población laboral. Existen otras agencias como la Agencia para el Registro de Sustancias Tóxicas y Enfermedades (ATSDR, por sus siglas en inglés), el Instituto Nacional de Salud y Seguridad Ocupacional (NIOSH) y la Agencia de Protección Ambiental (US EPA), quienes han publicado metodologías de análisis y los límites de concentración ambientales para BTEX.

En México la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 establece los límites para «Agua para uso y consumo humano», la cual no regulaba los BTEX. En el 2000 se hizo una modificación de la norma donde se incluye a los BTEX como

contaminantes y se establecen límites máximos permisibles (LMP), los cuales son competitivos frente a otros organismos internacionales, tal como se muestra en la tabla 2. Esto evidencia una comparativa de los LMP para agua potable establecidos por algunas agencias regulatorias en el mundo; siendo la Australian Drinking Water Guidelines (ADWG) la más exigente (NHMRC, 2011). La US EPA reporta como límites máximos permisibles para BTEX en agua potable 0.005 ppm para benceno, 1.0 ppm para tolueno, 0.7 ppm para etilbenceno y 10 ppm para xilenos, mientras que la norma mexicana MODIFICACIÓN-NOM-127-SSA1-1994 reporta 0.01, 0.7, 0.3 y 0.5 ppm respectivamente, siendo la normativa mexicana más estricta para tolueno, etilbenceno y xilenos, pero más laxa para benceno (MODIFICACIÓN-NOM-127-SSA1-1994).

En Estados Unidos, por ejemplo, más del 90% de sus fuentes de agua cumplen con las normativas establecidas por la US EPA, generando agua de «buena calidad» (Beauvais, 2016). En México la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) reporta que el 41.72% de los cuerpos de agua en 2018 tenían límites aceptables de calidad de agua (buena calidad); el resto de los sitios obtuvo una calificación que varió de buena calidad a fuertemente contaminada (CONAGUA, 2017). Por lo que hace falta que se realicen más monitoreos con parámetros que sirvan de indicadores de contaminación como los BTEX y se continúe trabajando en el desarrollo de tecnologías para el tratamiento de agua.



**EN EL 2000 SE HIZO UNA MODIFICACIÓN DE LA NORMA DONDE SE INCLUYE A LOS BTEX COMO CONTAMINANTES Y SE ESTABLECEN LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES.**

Asimismo, en México, la mayor parte de las actividades de la industria petroquímica están a cargo de PEMEX, quien ha informado que los impactos ambientales a nivel local continúan siendo materialmente consistentes de un año a otro; afectando principalmente aspectos como el uso del agua, descarga de aguas residuales, derrames, gestión de residuos y pasivos ambientales, lo que continúa siendo parte fundamental para el desempeño ambiental (PEMEX, 2017b). Aunque esta empresa es la encargada de la exploración, explotación y refinación del petróleo, no es responsable del 100% de los derrames de hidrocarburos y la contaminación de cuerpos de agua (Soto *et al.*, 2000). En el estado de Puebla se ha reportado que debido al robo o mal uso de los combustibles han ocurrido derrames en canales de agua que se utilizan para la agricultura, afectando y poniendo en riesgo a la sociedad mexicana que consume estos productos (Cavazos-Arroyo *et al.*, 2014).

**● Toxicidad y normatividad BTEX**

Los compuestos BTEX están ampliamente distribuidos en el medio ambiente debido a procesos naturales y sintéticos. No obstante, las sustancias producidas a través de las actividades humanas son de mayor preocupación por su toxicidad y cantidad eliminada al ambiente (Buswell, 2001). Los efectos a la salud producidos por BTEX son conocidos desde hace varias décadas. Las vías de exposición a estos compuestos generan severos efectos negativos para la salud que pueden ocurrir por ingestión de agua contaminada o por inhalación, causando efectos negativos que incluyen cáncer, lesiones hepáticas e irritación de órganos (OHD, 1994). Mitra y Roy (2011) informaron que la exposición al BTEX durante un corto periodo de tiempo produce irritación de piel y problemas en el sistema nervioso por inhalación. Al ser los BTEX contaminantes prioritarios de acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (US EPA, por sus siglas en inglés), su tratamiento es fundamental dado que si no son tratados aumenta el riesgo de enfermedades relacionadas con el consumo de agua contaminada con BTEX (Abumaizar *et al.*, 1998).

Resulta de suma importancia conocer de forma general la toxicidad del BTEX, ya que de-

**EL COMPLEJO PETROQUÍMICO CANGREJERA**

**en 2016**

**REPORTÓ QUE PRODUJO 47 MIL TONELADAS MÉTRICAS (TM) DE BENCENO, 87 MIL TM DE TOLUENO, 38 MIL TM DE ETILBENCENO Y 98 MIL TM DE XILENOS; GENERANDO EN TOTAL 270 MIL TM DE BTEX SÓLO PARA ESTE COMPLEJO .**

bido a sus propiedades fisicoquímicas éstos tienen la capacidad de atravesar la barrera hematoencefálica y producir daño orgánico cerebral por su acción neurotóxica (Spiker y Morris, 2001; Saeed y Al-Mutairi, 1999). Al consultar la publicación de ATSDR (2007), en el apartado tres referido a «Health Effects», se especifica que «las dosis orales letales para humanos se han estimado en 10 ml (125 mg / kg) para una persona de 70 kg». El benceno es considerado como el compuesto más peligroso de la mezcla BTEX, y está catalogado como carcinógeno y genotóxico de categoría 1 (Glascoe *et al.*, 2014). En 1948, el Instituto Americano del Petróleo, declaró que «generalmente se considera que la única concentración absolutamente segura para el benceno es cero» (API, 1948).

La exposición diaria al BTEX juega un rol primordial en cuanto a su efecto a la salud pública. Las regulaciones establecidas por la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional de los Estados Unidos de Norteamérica (OSHA, 1999), limitan la exposición por inhalación laboral a benceno a un máximo de 1 parte por millón (ppm) en promedio durante una jornada laboral de ocho horas. En cuanto a México existe la NOM-047-SSA1-1993 que establece «los límites biológicos máximos permisibles del tipo de hidrocarburos aromáticos, para valorar el riesgo a que pueden estar expuestos los trabajadores que laboran con estas sustancias y los efectos que generan a la salud».

El complejo petroquímico Cangrejera (Coatzacoalcos, Veracruz) en 2016 reportó que produjo 47 mil toneladas métricas (Tm) de benceno, 87 mil Tm de tolueno, 38 mil Tm de etilbenceno y 98 mil Tm de xile-

**EN MÉXICO LA COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (CONAGUA) REPORTA QUE EL 41.72% DE LOS CUERPOS DE AGUA EN 2018 TENÍAN LÍMITES ACEPTABLES DE CALIDAD DE AGUA (BUENA CALIDAD).**





# Xileno

Como se mencionó previamente, la transferencia del BTEX no sólo se da a través de derrames en ríos, lagos y mares, también puede ser influenciada por las infiltraciones o transferencia a suelos. Para esto, México cuenta con la Norma Oficial NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, que establece los LMP del BTEX en suelo. Al revisar el contenido de la Norma Oficial NOM-138 puede leerse que los límites máximos permisibles para suelos contaminados con BTEX son 6, 40, 10 y 40 mg/kg base seca de suelo para benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos, respectivamente. Lo que permite garantizar menos riesgos de contaminación al agua subterránea por infiltraciones.

Desde hace algunos años México adquirió compromisos a nivel nacional e internacional que, en general, consisten en revertir y tratar los problemas de contaminación principalmente en agua, suelo y aire, generados por el progreso tecnológico y las actividades industriales. A través de la implementación del Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales (PROMARNAT) 2013-2018; se estableció en el quinto objetivo «detener y revertir la pérdida de capital natural y la contaminación del agua, aire y suelo». Su propósito es fortalecer la verificación del cumplimiento de la normatividad ambiental, así como el fortalecimiento a la gestión en la remediación de sitios contaminados y mejorar la calidad del agua en las cuencas y acuíferos del país, mediante estrategias que incluyan el desarrollo y actualización de los instrumentos normativos y de fomento en específico a la extracción de hidrocarburos en el mar, así como en sitios contaminados por hidrocarburos. La implementación de estos compromisos debe fortalecer a futuro los programas para la protección del medio ambiente que eleven la competitividad en materia de calidad de agua y al mismo tiempo reduzcan el impacto a los cuerpos de agua (PROMARNAT, 2013).

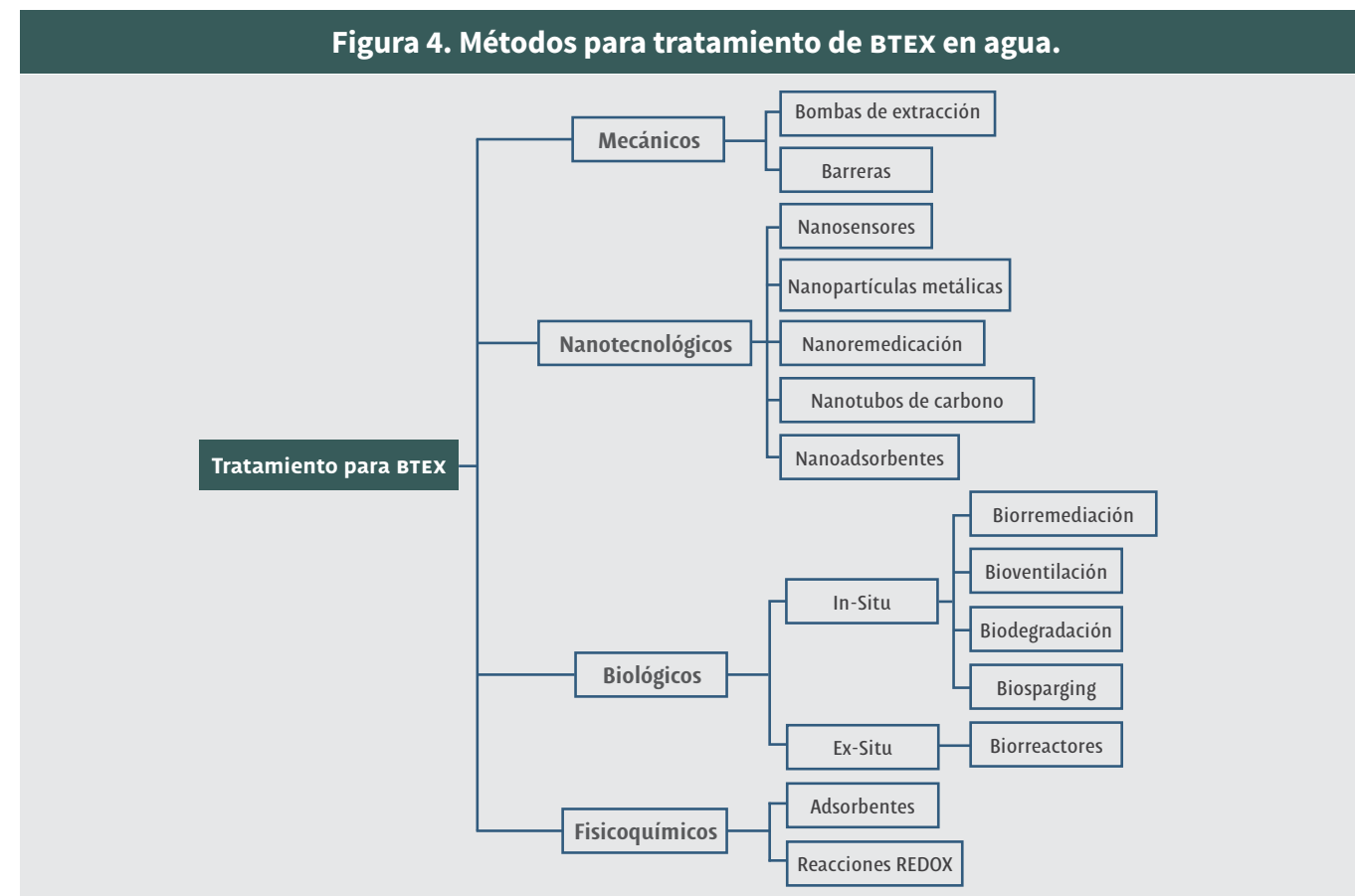
Existe una necesidad urgente de controlar la contaminación por BTEX bajo una gestión sostenible a través de técnicas que sean rentables, eficientes y sostenibles (El-Ramady *et al.*, 2017).

### ● Técnicas para el tratamiento de BTEX

Los procesos de remediación de suelos y acuíferos contaminados con hidrocarburos se habían enfocado a los hidrocarburos poliaromáticos (HAP) que se refieren a las fracciones de petróleo pesado. Estos contaminantes afectan al ambiente notablemente (Bojes y Pope, 2007; Romo-Gómez *et al.*, 2010). Sin embargo, los compuestos BTEX son más abundantes que los HAP en el ambiente debido a que se usan con mayor frecuencia en las industrias (Fayemiwo *et al.*, 2017).

A lo largo del tiempo se han buscado métodos de tratamiento que sean más eficientes, menos costosos y más amigables con el ambiente para el BTEX. En la búsqueda de nuevos métodos para el tratamiento de agua y suelo contaminados con BTEX se ha observado que la combinación de los métodos convencionales con nuevas tecnologías ha producido tratamientos más rápidos y eficientes. Existen muchos enfoques que pueden adoptarse en el proceso del tratamiento de la contaminación del BTEX. Cada uno de estos métodos tiene ventajas y desventajas, y su uso depende de distintas variables como grado de contaminación, tiempo de contacto, carga del contaminante, costo y eficiencia. Los métodos de tratamiento comúnmente usados pueden ser mecánicos, fisicoquímicos, biológicos o nanotecnológicos como tecnología emergente. Otras tecnologías comunes también utilizadas son la evaporación, el enterramiento, la dispersión y el lavado. A menudo estas últimas técnicas conducen a una descomposición incompleta de los contaminantes. En la figura 4 se muestra una recopilación general de los métodos empleados actualmente para el tratamiento de BTEX. Los métodos llamados «mecánicos» se refieren al uso de equipos para responder en un tiempo corto de uno a cinco días ante una emergencia ambiental, sin embargo, requieren de un método secundario (biológico o fisicoquímico) para eliminar por completo el BTEX. Un ejemplo de ello es el uso de bombas cuyo objetivo es extraer el BTEX en acuíferos profundos has-

Figura 4. Métodos para tratamiento de BTEX en agua.



Elaboración con información de Das y Chandran (2011).

ta dejar una película delgada donde posteriormente se bombea oxígeno para el desarrollo de organismos biológicos para su descomposición (SCT, 2002). Las barreras se utilizan habitualmente para rodear y contener el derrame de BTEX en agua, con el fin de evitar que se desvíe y se extienda por el acuífero, así como recolectar el BTEX mediante una bomba hacia un punto específico (ITOPF, 2014). El aprovechamiento de la efectividad de cada método dependerá de las condiciones del lugar y de la concentración, entre otros factores. En el siguiente apartado se discutirá el uso de los tratamientos biológicos y nanotecnológicos para BTEX en agua.

### ● Métodos biológicos para el tratamiento de BTEX

El uso de los microorganismos son, en particular, los agentes dominantes de la degradación de hidrocarburos en el medio ambiente (Röling *et al.*, 2002). Existen diferentes métodos biológicos para el tratamiento de BTEX en agua y su aplicación consiste en degradar estos contaminantes empleando microorganismos que tienen la capacidad de utilizar hidrocarburos como fuente de carbón y/o energía en su acti-

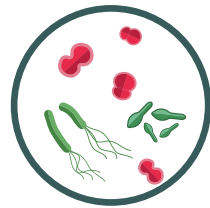
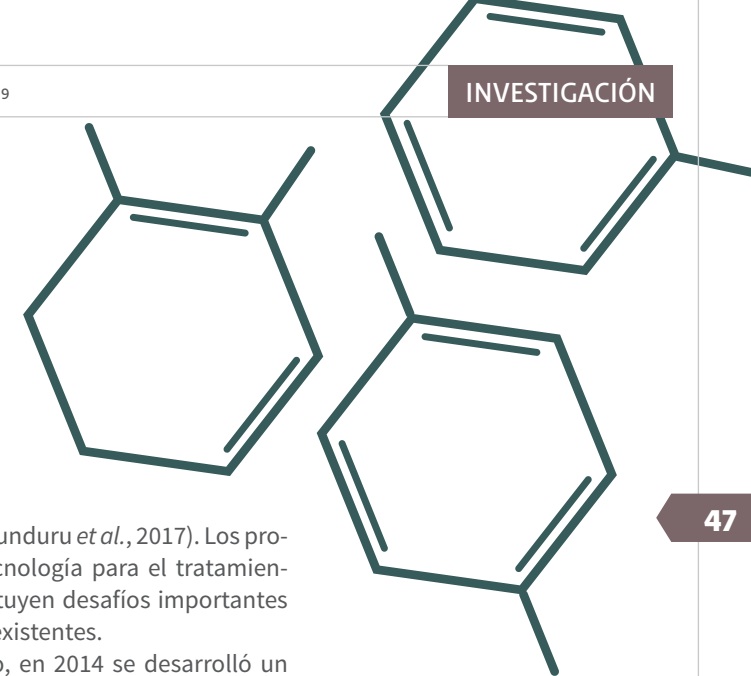
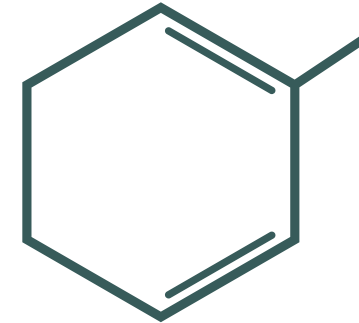
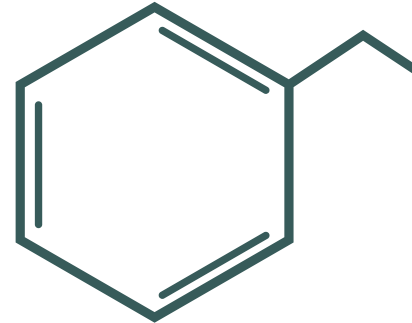
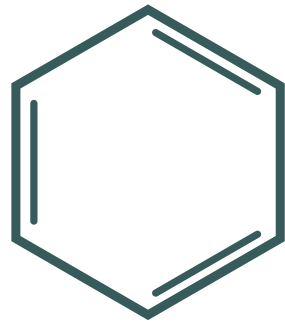
vidad metabólica (Vidali, 2001). Acuña-Askar *et al.* (2003) demostraron que la biodegradación aerobia puede remover hasta el 99% del benceno y el 92% de los xilenos presentes en agua en un lapso de diez días; no obstante, el tiempo necesario para el tratamiento biológico de BTEX es largo. Otro de los métodos más usados para la degradación del BTEX es la biorremediación, dado que es un procedimiento económico y ecológico basado en las capacidades metabólicas de los microorganismos para degradar contaminantes bioquímicamente, una de sus ventajas es que es una técnica *in situ*, posicionándose en una de las mejores (Huang *et al.*, 2013).

La bioaumentación es una estrategia que consiste en agregar organismos degradadores al ambiente afectado, en comparación con la bioestimulación que consta en proporcionar un ambiente favorable para que las bacterias degraden los contaminantes de manera efectiva (Kaplan y Kitts, 2004).

El uso de la bioaumentación para los BTEX se evaluó mediante cinéticas de biodegradación por un consorcio microbiano previamente bioaumentado y aclimatado a gasolina sin plomo. Se encontró que los porcentajes de re-



**LA ELIMINACIÓN DE BTEX DEL AGUA HA SIDO AMPLIAMENTE ESTUDIADA, Y SE HAN APLICADO VARIOS PROCESOS, INCLUYENDO LA BIORREMEDIACIÓN, VOLATILIZACIÓN, OXIDACIÓN Y ADSORCIÓN.**



### EXISTEN DIFERENTES MÉTODOS BIOLÓGICOS PARA EL TRATAMIENTO DE BTEX EN AGUA Y SU APLICACIÓN CONSISTE EN DEGRADAR ESTOS CONTAMINANTES EMPLEANDO MICROORGANISMOS QUE TIENEN LA CAPACIDAD DE UTILIZAR HIDROCARBUROS COMO FUENTE DE CARBÓN Y/O ENERGÍA EN SU ACTIVIDAD METABÓLICA.

moción estaban entre 95.1-99.5% para benceno, tolueno y etilbenceno, sin embargo, era difícil biodegradar el o-xileno 56.0-89.8% (Acuña *et al.*, 2008). De acuerdo con Lin, *et al.* (2012), quienes estudiaron la degradación de BTEX por medio de perlas de liberación de oxígeno (ORB, por sus siglas en inglés) y perlas de células inmovilizadas de liberación de oxígeno (ORICB, por sus siglas en inglés), en donde a una concentración de BTEX de 120 ppm, se eliminó 67% de benceno y el 81-90% de TEX.

La mayoría de las técnicas en biorremediación son de naturaleza aeróbica, pero se están desarrollando procesos anaeróbicos para ayudar a degradar los contaminantes en áreas con déficit de oxígeno (Franchi *et al.*, 2016).

Otra de las ventajas en el uso de la biorremediación es que garantiza que los desechos que se puedan generar se incorporen al medio ambiente. Además, que el costo es menor comparado a los métodos fisicoquímicos

Lei *et al.*, (2010); Franchi *et al.*, (2016). Las limitaciones del uso de la biorremediación se centran en que los hidrocarburos altamente aromáticos son muy resistentes a la degradación microbiana, su tiempo de degradación es de 45 días y, por lo tanto, su velocidad de degradación es lenta; por lo que se continúa con la búsqueda de microorganismos susceptibles a degradar el BTEX. Dado que, su crecimiento debe ser muy específico y controlado, genera otra limitación a su uso (De la Cueva *et al.*, 2016).

En un estudio presentado por Bradley y Chapelle (1995) se usó la biorremediación *in situ* para tratar el BTEX a bajas temperaturas (inferiores a 5°C) en agua subterránea en Alaska en comparación con temperaturas de 20°C o más. Los resultados mostraron que a bajas temperaturas se mineralizaban a 16.3% más rápido que a 20°C, donde se obtuvo una mineralización de 5.1%, por lo que se concluyó que a bajas temperaturas se obtiene una mejor mineralización.

Cunningham *et al.* (2001) estudiaron la biorremediación *in situ* de los compuestos BTEX en Seal Beach, California. En este estudio, los autores usaron un sistema de inyección combinada de nitrato y sulfato en el acuífero contaminado para acelerar la biodegradación de BTEX y compararon sus resultados con el método de la remediación por atenuación natural (RNA), usado convencionalmente para tratar la contaminación de las aguas subterráneas por BTEX. El sistema RNA mostró una desventaja frente a un sistema de inyección acoplado debido a que es lento para biodegradar los BTEX y resultó poco efectivo para biodegradar benceno; por lo que los autores determinaron que el de inyección es más eficiente ya que es capaz de estimular la biodegradación.

También se ha usado la degradación fúngica para la biorremediación del BTEX, usando mecanismos de degradación, elucidación de las vías catabólicas y enzimas aplicadas en el diseño y operación de biosensores (Buswe-

ll, 2001). Se ha demostrado que los hongos deuteromicetos pertenecientes a los géneros *Cladophialophora* (CPH) y *Cladosporium* (CS) pueden degradar los BTEX. Sin embargo, estas cepas fúngicas no son capaces de degradar benceno presentando una desventaja en comparación con la biorremediación; en cuanto a tolueno, etilbenceno y xileno fueron capaces de degradarlos completamente (Nikolova y Nenov, 2005).

#### ● Tratamientos no convencionales de BTEX

La eliminación de BTEX del agua ha sido ampliamente estudiada, y varios procesos se han aplicado, incluyendo la biorremediación, volatilización, oxidación y adsorción, pero constantemente se buscan nuevos tratamientos basados en las tecnologías emergentes. La nanotecnología proporciona procesos eficientes, modulares y multifuncionales en su naturaleza; además de dar soluciones innovadoras para el tratamiento de agua y en específico de los BTEX (Ingle *et al.*, 2014). Esta tecnología aporta un enfoque alternativo para tratar los problemas de contaminación, usando como base los métodos tradicionales y añadiéndole los beneficios de la nanotecnología. Se podrían caracterizar algunas aplicaciones principales de la nanotecnología, como la detección mediante nanosensores, la prevención de contaminación, la purificación y eliminación de contaminantes mediante nanomateriales, nanopartículas, incluidos los nanotubos de carbono, las nanomembranas, los dendrímeros, los nanoadsorbentes, las zeolitas a nanoescala, las partículas bimetalicas, las enzimas y los óxidos metálicos, entre otros (Kuppusamy *et al.*, 2016; Patil *et al.*, 2016; Kaur *et al.*, 2017). Los nanomateriales se fabrican con características específicas como alta relación de aspecto, reactividad y volumen de poro sintonizable, superficie específica alta (SBET), e interacciones electrostáticas, hidrofílicas e hidrofóbicas, que son útiles en la adsorción, catálisis, sensores y

optoelectrónica (Kunduru *et al.*, 2017). Los procesos con nanotecnología para el tratamiento del agua constituyen desafíos importantes para los métodos existentes.

Dicho lo previo, en 2014 se desarrolló un sensor usando nanotubos de carbono y nanopartículas de oro para la detección de BTEX en agua, el cual pudiera responder inclusive a los LMP establecidos en este caso por US EPA (Cooper *et al.*, 2014). Una de las ventajas del uso de nanosensores versus los convencionales son los límites de detección en agua con BTEX, ya que Cooper *et al.* (2014), reportan que el nanosensor tiene un límite de detección de hasta 0.2 a 0.6 ppm en agua, versus los sensores que reportan que su límite de detección es de 0.5 ppm (Sekharz y Subramaniyam, 2014). Otra de las ventajas es que el ensamblaje de los nanosensores, además de su tamaño, es de resistencia química por ejemplo a la corrosión, así como mayor sensibilidad y optimización; además de que pueden transmitir información en tiempo real por 26 días continuos sin tener resistencia eléctrica. Las resistencias a la deriva no afectaron la sensibilidad de los nanomateriales, que se mantuvieron constantes con el tiempo (Dahman, 2017). Por lo que son una opción relevante para la detección del BTEX en agua frente a los convencionales.

Otra aplicación interesante usando nanomateriales surge de Peerakiatkhajohn *et al.* (2011), quienes desarrollaron una película delgada de plata (Ag) dopada con dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) sensible a la luz visible sobre plástico (PET) para el tratamiento del BTEX, que degradó el 79% con luz visible en un tiempo de 240 minutos. Al-Sabahi *et al.* (2017), usaron ZnO soportado en nanobarras bajo luz visible, donde obtuvieron una degradación de más del 80% del BTEX en agua en un tiempo de 180 minutos.

Otro campo que se ha explorado en los nanomateriales es el uso de nanoadsorbentes, ya que poseen una serie de propiedades físicas y



**LOS NANOCOMPUESTOS TIENEN UNA ALTA POSIBILIDAD DE SER APLICADOS PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES Y PROMETEN SER MÁS EFICIENTES.**

químicas únicas. Debido a que su área superficial es grande, permite adsorber fuertemente muchas sustancias, incluidos los metales traza y los compuestos orgánicos polares (Khajeh, Laurent y Dastafkan, 2013). Estos nanoadsorbentes pueden tener la característica de recuperarse del agua y regenerarse después de su uso (Thobeka y Sudesh, 2017). Se evaluó la efectividad de la zeolita modificada con surfactante (SMZ) para el BTEX, donde los resultados publicados por Ranck *et al.* (2005), determinaron que es capaz de realizar hasta diez ciclos de sorción/regeneración de SMZ, sin embargo, su capacidad de absorción va disminuyendo.

Por otro lado, las nanopartículas metálicas de hierro (Fe), se han convertido en gran interés en el tratamiento de agua, puesto que permiten eliminar con mayor facilidad los contaminantes. Wang, *et al.*, (2010), destacaron que el magnetismo de las nanopartículas de hierro las hace viables para la remoción de BTEX (por métodos catalíticos) y su fácil manipulación para su recuperación del agua.

Los nanotubos de carbono (CNT, por sus siglas en inglés), son conocidos por su alta capacidad de adsorción, debido a su pequeño tamaño y gran superficie activa. La eliminación de BTEX también se puede dar por medio de CNT de paredes múltiples y de pared simple (MWCNTs y SWCNTs, por sus siglas en inglés), en donde también se presenta que después de adsorberse el BTEX, estos materiales pueden desorberse fácilmente usando altas temperaturas 102°C (Bina *et al.*, 2014).

Otra estrategia prometedora es la nanoremediación, que describe el uso de nanopartículas (NP) o compósitos en el tratamiento de aguas contaminadas, en este caso con BTEX, donde los procesos de nanoremediación generalmente implican reducción, oxidación, sorción o combinación de estos (Bardos *et al.*, 2018). Varias nanopartículas se han utilizado con éxito en nanoremediación, como nanopartículas de hierro (Fe), nanopartículas de ZnO y TiO<sub>2</sub>, nanopartículas magnéticas, nanopartículas de ferritina, nanopartículas poliméricas y nanopartículas bioactivas (Kaur *et al.*, 2017).

El uso de nanopartículas en el tratamiento de contaminantes es prometedor, sin embargo, su modo de acción debe ser específico, por lo tanto, en los últimos años se ha trabajado en el desarrollo de nanocompuestos (Pandey *et al.*,

2017). Los nanocompuestos tienen una alta posibilidad de ser aplicados para la remoción de contaminantes y prometen ser más eficientes. Tal es el caso reportado, por Su, Lu y Tai, (2016), quienes diseñaron una membrana con nanotubos de carbono/fluoruro de polivinilideno, para la remoción de BTEX en soluciones acuosas para su aplicación en aguas residuales. También se han utilizado nanocompuestos y polímeros para el tratamiento del BTEX (Kharisov, Kharissova y Rasika, 2014).

Pese a que la nanotecnología apunta a ser una herramienta para el tratamiento de agua a futuro, hay escasos reportes acerca de la toxicidad y riesgo para su uso para los BTEX (Fayemiwo *et al.*, 2017). En lo que concierne a México, aún no existe una normativa que regule el uso de los nanomateriales en aplicaciones al medio ambiente y por ende existe una necesidad inmediata de generar una regulación para su uso.

## CONCLUSIONES

Los BTEX se utilizan a nivel mundial en productos de consumo y se liberan al agua, producto de las operaciones de petróleo y gas natural, que están cada vez más cerca de hogares, escuelas y otros lugares de actividad humana, afectando a los mares y ríos, así como fuentes de agua potable y aguas subterráneas. Los continuos esfuerzos han llevado al desarrollo de regulaciones más estrictas y exitosas enfocadas en controlar y reducir los niveles del BTEX en agua. Tal es el caso de la agencia ADWG, quienes han establecido límites muy estrictos para el BTEX. Se deben dirigir esfuerzos para reducir la contaminación por BTEX.

Si bien México está trabajando y creando compromisos a nivel nacional e internacional en materia ambiental, en específico en el sector de agua, con el fin de obtener una mejora en su calidad de agua, se deben seguir evaluando los sitios contaminados a corto y largo plazo; así como reducir el número de eventos de fugas y derrames de hidrocarburos a fuentes de agua.

Respecto a los tratamientos para los BTEX es necesario modernizarlos para crear sistemas integrales que incorporen nuevas tecnologías para mejorar su eficiencia. Los tratamientos de agua presentados en esta revisión son algunos que se utilizan hoy en día; los cuales tienen ventajas y desventajas. La nanotecnología ofrece una estrategia interesante para tratar la

contaminación del agua, en particular con BTEX. Como resultado, el interés en estos materiales ha aumentado significativamente en la última década dando pauta a investigaciones a futuro.

Esta revisión muestra que los BTEX son una problemática ambiental que está afectando a las fuentes de agua continuamente. Los estudios continúan con la búsqueda de nuevas metodologías y aplicaciones que puedan ser más eficientes, a corto tiempo, a menor costo y que no añadan subproductos al medio ambiente después de su tratamiento; presentando una importante línea de investigación para futuras investigaciones.



### Ana Karen Cordova Estrada

#### AUTOR DE CORRESPONDENCIA

Licenciada en Nanotecnología e Ingeniería Molecular por la Universidad de las Américas Puebla; cuenta con un diplomado en Auditoría Ambiental por la UPAEP. Ha participado en diferentes estancias de investigación nacionales e internacionales y participado en congresos nacionales e internacionales relacionados a su disciplina. Actualmente es estudiante del doctorado en Ciencias del Agua en la UDLAP y es locutor en el programa de Climate Reality UDLAP por Elocuencia 8080. [ana.cordova@udlap.mx](mailto:ana.cordova@udlap.mx)



### René Alejandro Lara Díaz

Doctor en Ingeniería y Ciencias Aplicadas con especialidad en Tecnología Química por el Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAP) de la Universidad Autónoma de Morelos. Maestro en Ciencias con especialidad en Ingeniería Ambiental por el ITESM, campus Monterrey. Licenciado en Ingeniería Química Industrial por la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP). Actualmente es decano de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP), es vicepresidente general 2018-2020 de la Asociación Nacional de Facultades y Escuelas de Ingeniería (ANFEI), auditor-certificador de Sistemas de Administración Ambiental (ISO-14001), evaluador de programas de ingeniería del Consejo de Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería (CACEI) y fue miembro de la Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química (AMIDIQ). [renea.lara@udlap.mx](mailto:renea.lara@udlap.mx)



### Felipe Cordova Lozano

Doctor en Química, con especialidad en Química Molecular y Estructural por la Université Joseph Fourier Grenoble, Francia. Maestro en Ciencias con especialidad en Ingeniería Química por la Universidad de las Américas Puebla, donde actualmente labora como profesor de tiempo completo en el Departamento de Ciencias Químico-Biológicas, egresado de la Licenciatura en Química Industrial por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. El Dr. Córdova ha realizado estancias de investigación en instituciones como: Brigham Young University, en Utah y The University of Texas at San Antonio. Ha publicado 14 artículos con arbitraje a nivel internacional, dirigido 17 tesis y participado en congresos nacionales e internacionales relacionados a su disciplina. Actualmente trabaja en la realización de proyectos que utilicen nanomateriales 1D en donde se incluyen nanofibras, nanotubos y nanoalambres para procesos de fotocatálisis. Es profesor de tiempo completo de la UDLAP. [felipe.cordova@udlap.mx](mailto:felipe.cordova@udlap.mx)

## REFERENCIAS

- Abumaizar, R. J., Kocher, W. y Smith, E. (1998). Biofiltration of BTEX contaminated air streams using compost-activated carbon filter media. *J Hazard Mater*, 111-126.
- Acuña, K., Villareal, J., Gracia, M., Tijerina, R., Garza, M., Chávez, B., . . . Barrera, H. (2008). Cinética de biodegradación de mezclas BTEX-EMTB por medio de un proceso de bioaumentación. *CIENCIA UANL*, IX.
- Acuña-Askar, K., Englande, A., Ramirez-Medrano, A., Coronado-Guardiola, J. y Chavez-Gomez, B. (2003). Evaluation of biomass production in unleaded gasoline and BTEX-fed batch reactors. *Water Science and Technology*, 48(8), 127-133. doi:10.2166/wst.2003.0461
- Aivalioti, M., Pothoulaki, D., Papoulias, P. y Gidarakos, E. (2012). Removal of BTEX, MTBE and TAME from aqueous solutions by adsorption onto raw and thermally treated lignite. *Journal of Hazardous Materials*, 207, 136-146.
- Al-Sabahi, J., Bora, T., Al-Abri, M. y Dutta, J. (2017). Efficient visible light photocatalysis of benzene, toluene, ethylbenzene and xylene (BTEX) in aqueous solutions using supported zinc oxide nanorods. *PLoS One*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189276>
- API. (1948). A toxicological review of benzene. *American Petroleum Institute*.
- ATSDR. (2007). *Toxicological Profile for Benzene*. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service.
- Banerjee, A., Roy, A., Dutta, S. y Mondal, S. (2016). Bioremediation of hydrocarbon- A Review. *International Journal of Advanced Research*, 4(6), 1303-1313. doi:10.21474/IJAR01
- Bardos, P., Merly, C., Kvapil, P. y Koschitzky. (2018). Status of nanoremediation and its potential for future deployment: Risk-benefit and benchmarking appraisals. *Remediation Journal*, 43-56. doi:10.1002/rem.21559
- Beauvais, J. (2016). *EPA Blog*. Recuperado de Moving Forward for America's Drinking Water. <https://blog.epa.gov/2016/04/26/moving-forward-for-americas-drinking-water/>
- Belayachi, A., Bestani, B., Bendraoua, A., Benderdouche, N. y Duclaux, L. (2015). The influence of surface functionalization of activated carbon on dyes and metal ion removal from aqueous media. *Desalination and Water Treatment*, 17557-17569. doi:10.1080/19443994.2015.1086701
- Bina, B., Amin, M., Rashidib, A. y Pourzamani, H. (2014). Water and wastewater treatment from BTEX by carbon nanotubes and NanoFe. *Water Resources*, 719-727. doi:10.1134/S0097807814060037
- Bojes, H. K. y Pope, P. G. (2007). Characterization of EPA's 16 priority pollutant polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in tank bottom solids and associated contaminated soils at oil exploration and production sites in Texas. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 47(3), 288-295. doi:10.1016/j.yrtph.2006.11.007
- Bradley, P. y Chapelle, F. H. (1995). Rapid Toluene Mineralization by Aquifer Microorganisms at Adak, Alaska: Implications for Intrinsic Bioremediation in Cold Environments. *Environ. Sci. Technol.* 2778-2781. doi:10.1021/es00011a012

• Buswell, J. (2001). Fungal biodegradation of chlorinated monoaromatics and BTEX compounds. En G. Gadd, *Fungi in Bioremediation* (pp. 113-135). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511541780.007

• Castillo, M., Oubiña, A. y Barceló, D. (1998). Evaluation of ELISA kits followed by liquid chromatography-atmospheric pressure chemical ionization-mass spectrometry for the determination of organic pollutants in industrial effluents. *Environ. Sci. Technol.*, 32(14), 2180-2184. doi:10.1021/es971042z

• Cavazos-Arroyo, J., Pérez-Armendáriz, B. y Mauricio-Gutiérrez, A. (2014). Impacts and consequences from hydrocarbon spills on agricultural soils in Acatzingo, Puebla, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 11(4).

• Chesnaux, R. (2008). Analytical closed-form solutions for assessing pumping cycles, times, and costs required for NAPL remediation. *Environmental Geology*, 1381-1388. doi:10.1007/s00254-007-1088-9

• CONAGUA. (2017). *Estadísticas del Agua en México*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de [http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM\\_2017.pdf](http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2017.pdf)

• Cooper, S., Myers, M., Chow, E., Hubble, L., Cairney, J., Pejčić, B., . . . Raguse, B. (2014). Performance of graphene, carbon nanotube, and gold nanoparticle chemiresistor sensors for the detection of petroleum hydrocarbons in water. *Journal of Nanoparticle Research*. doi:10.1007/s11051-013-2173-5

• Cunningham, J. A., Rahme, H., Hopkins, G. D., Lebron, C. y Reinhard, M. (2001). Enhanced In Situ Bioremediation of BTEX-Contaminated Groundwater by Combined Injection of Nitrate and Sulfate. *Environmental Science & Technology*, 35(8), 1663-1670. doi:10.1021/es001722t

• Dahman, Y. (2017). Chapter 4 - Nanosensors. *Nanotechnology and Functional Materials for Engineers*, 67-71. doi:10.1016/B978-0-323-51256-5.00004-6

• Daifullah, A. y Kirgis, B. (2003). Impact of surface characteristics of activated carbon on adsorption of BTEX. *Colloids And Surfaces A: Physicochemical And Engineering Aspects*, 214(1-3), 181-193. doi:10.1016/S0927-7757(02)00392-8

• Das, N. y Chandran, P. (2011). Microbial Degradation of Petroleum Hydrocarbon Contaminants: An Overview. *Biotechnology Research International*. doi:10.4061/2011/941810

• De la Cueva, S., Rodríguez, C., Cruz, N., Contreras, J. y Miranda, J. (2016). Changes in Bacterial Populations During Bioremediation of Soil Contaminated with Petroleum Hydrocarbons. *Water Air Soil Pollut*, 1-12. doi:10.1007/s11270-016-2789-z

• El-Naas, M. H., Acio, J. A. y El-Telib, A. (2014). Aerobic biodegradation of BTEX: Progresses and Prospects. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1104-1122. doi:10.1016/j.jece.2014.04.009

• El-Ramady, H., Alshaal, T., El-Henawy, H., Abdalla, N., Taha, S., Elmahrouk, M., . . . Domokos-Szabolcsy, E. (2017). Environmental Nanoremediation under Changing Climate. *Environment, Biodiversity and Soil Security*, 109-128. doi:10.21608/jenvbs.2017.1550.1009

• Fatehifar, E., Kahforoshan, D., Khazin, L., Soltanmohammadzadeh, J. y Sattar, H. (2008). Estimation of VOC emission from wastewater treatment unit in a petrochemical plant using emission factors. *WSEAS Conferences Cantabria*. Spain.

• Fayemiwo, O. M., Daramola, O. M. y Moothi, K. (2017). BTEX compounds in water-future trends and directions for water. *Water SA*, 43(4), 602-613. doi:10.4314/wsa.v43i4.08

• Franchi, E., Agazzi, G., Rolli, E., Borin, S., Marasco, R., Chiaberge, S. y Barbafieri, M. (2016). Exploiting hydrocarbon-degrader indigenous bacteria for bioremediation and phytoremediation of a multi-contaminated soil. *Chemical Engineering & Technology*, 39(9), 1676-1684. doi:10.1002/ceat.201500573

• Glascoe, V., Alysse, C., Arellano, E., Walter, L., Espejel, I., Villada, M., . . . Arredondo, C. (2014). Emisión de Btex por las gasolineras, proximidad geográfica y síntomas neurológicos en residentes de Ensenada, Baja California, México. *Ecorfan: Ciencias Naturales y Exactas- Hanbook T-11*, 124-139.

• González-Alonso, S., Esteban-Hernández, J., Valcárcel, Y., Hernández-Barrera, V. y Gil de Miguel, A. (2010). Contaminación del agua en fuentes cercanas a campos petrolíferos de Bolivia. *Rev. Panam Salud Pública*, 235-243.

• Gross, S., Heather, J., Banducci, A., Sahmel, J., Panko, J. y Tvermoes, B. (2013). Analysis of BTEX groundwater concentrations from surface spills associated with hydraulic fracturing operations. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 424-432. doi:10.1080/10962247.2012.759166

• Huang, L., Xie, J., Lv, B.-y., Shi, X., Liang, F. y Lian, J. (2013). Optimization of nutrient component for diesel oil degradation by *Acinetobacter beijerinckii* ZRS. *Marine Pollution Bulletin*, 325-332. doi:10.1016/j.marpolbul.2013.03.037

• INECC. (2017). *Estudio para determinar la exposición personal a CO, PM2.5 y BTEX, en Salamanca, Guanajuato*. México: SEMARNAT.

• Ingle, A., Seabra, A. B., Duran, N. y Rai, M. (2014). 9 - Nanoremediation: A New and Emerging Technology for the Removal of Toxic Contaminant from Environment. En S. Das, *Microbial Biodegradation and Bioremediation* (pp. 233-250). Elsevier. doi:10.1016/B978-0-12-800021-2.00009-1

• ITOPF. (2014). *Uso de barreras en la respuesta a la contaminación por hidrocarburos*. London: ITOPF.

• Kaplan, C. y Kitts, C. (2004). Bacterial succession in a petroleum land treatment unit. *Applied and Environmental Microbiology*, 1777-1786. doi:10.1128/AEM.70.3.1777

• Kaur, J., Pathak, T., Singh, A. y Kumar, K. (2017). Application of Nanotechnology in the Environment Biotechnology. En R. Kumar, A. Sharma, y S. Ahluwalia, *Advances in Environmental Biotechnology* (pp. 155-165). Singapore: Springer. doi:10.1007/978-981-10-4041-2\_9

• Khajeh, M., Laurent, S. y Dastafkan, K. (2013). Nano-adsorbents: Classification, Preparation, and Applications (with Emphasis on Aqueous Media). *Chemical Reviews*, 7728-7768. doi:10.1021/cr4000086v

• Kharisov, B., Kharissova, O. y Rasika, H. (2014). Nanocomposites for BTEX removal. En B. Kharisov, O. Kharissova y H. Rasika, *Nanomaterials for Environmental Protection*. Nueva Jersey: John Wiley & Sons, Inc. doi:10.1002/9781118845530

• Kunduru, R., Nazarkovsky, M., Farah, S., Pawar, P., Basu, A. y Domb, A. (2017). 2- Nanotechnology for water purification: Applications of nanotechnology methods in wastewater treatment. En A. M. Alexandru Mihai Grumezescu, *Water Purification* (pp. 33-74). Academic Press. doi:10.1016/B978-0-12-804300-4.00002-2

• Kuppusamy, S., Palanisami, T., Megharaj, M., Venkates, K. y Naidu, R. (2016). In-Situ Remediation Approaches for the Management of Contaminated Sites: A Comprehensive Overview. En P. De Voogt, *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-319-20013-2\_1

• Lei, C., Li, C., Dong, S. y Shim, H. (2010). Bioremediation of Water Contaminated With BTEX, TPH and TCE Under Different Environmental Conditions. *Advances in Environmental Geotechnics*. doi:10.1007/978-3-642-04460-1\_95

• Lin, C. W., Wu, C. H., Tang, C. T. y Chang, S. H. (2012). Novel oxygen-releasing immobilized cell beads for bioremediation of BTEX-contaminated water. *Bioresource Technology*, 124, 45-51. doi:10.1016/j.biortech.2012.07.099

• Macaulay, B. (2015). Understanding the behaviour of oil-degrading micro-organisms to enhance the microbial remediation of spilled petroleum. *Appl. Ecol. Environ. Res*, 13(1), 247-262. doi:10.15666/aeer/1301\_247262

• Mehlman, M. (1992). Dangerous and cancer-causing properties of products and chemicals in the oil refining and petrochemical industry: VIII. Health effects of motor fuels: Carcinogenicity of gasoline-Scientific update. *Environmental Research*, 59(1), 238-249. doi:10.1016/S0013-9351(05)80243-9

• Mitra, S. y Roy, P. (2011). BTEX: A serious ground-water contaminant. *Research Journal of Environmental Sciences*, 5, 394-398. doi:10.3923/rjes.2011.394.398

• MOD-NOM-127-SSA1-1994. (2000). Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

• NHMRC. (2011). *Australian Drinking Water Guidelines Paper 6 National Water Quality Management Strategy*. Commonwealth of Australia, Canberra: National Health and Medical Research Council, National Resource Management Ministerial Council.

• Nikolova, N. y Nenov, V. (2005). BTEX degradation by fungi. *Water Science & Technology*, 51(11), 87-93. doi:10.2166/wst.2005.0394

• NOM-047-SSA1-1993. (1993). Norma Oficial Mexicana. Límites biológicos máximos permisibles de disolventes orgánicos en el personal ocupacionalmente expuesto.

• NOM-127-SSA1-1994. (1994). NOM-127-SSA1-1994, Norma Oficial Mexicana, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

• NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012. (2012). Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación.

• OHD. (1994). *Health Effects Information - BTEX*. Oregon: Office of Environmental Public Health.

• OSHA, O. (1999). *OSHA standard -29 CFR 1910.1028 (7/1/1999)*. National Library of Medicine, HSDB: Benzene, CARSN: 71-43-2.

• Pandey, N., Shukla, S. y Singh, N. (2017). Water purification by polymer nanocomposites: an overview. *Nanocomposites*, 47-66. doi:10.1080/20550324.2017.1329983

• Patil, S., Shedbalkar, A., Truskewycz, A., Chopade, B. y Ball, A. (2016). Nanoparticles for environmental clean-up: A review of potential risks and emerging solutions. *Environmental Technology & Innovation*, 5, 10-21. doi:10.1016/j.eti.2015.11.001

• Peerakiathajohn, P., Onreabroy, W., Chawengkijwanich, C. y Chirakorn, S. (2011). Preparation of visible-light-responsive TiO<sub>2</sub> doped Ag thin film on PET plastic for BTEX treatment. *Journal of Sustainable Energy & Environment*, 121-125.

• PEMEX. (2017a). *Anuario estadístico 2017*. MÉXICO: PEMEX. Recuperado de [http://www.pemex.com/ri/Publicaciones/Anuario%20Estadistico%20Archivos/anuario-estadistico\\_2017\\_es.pdf](http://www.pemex.com/ri/Publicaciones/Anuario%20Estadistico%20Archivos/anuario-estadistico_2017_es.pdf)

• PEMEX. (2017b). *Informe de sustentabilidad 2017*. México.

• PEMEX. (2017c). *Statistical Yearbook 2017*. México: PEMEX. Recuperado de <http://www.pemex.com/en/investors/publications/Documents/STATISTICAL-YEARBOOK-2017.pdf>

• PROMARNAT. (2013). *Plan nacional de desarrollo 2013-2018*. México: SEMARNAT. Recuperado de <https://datos.gob.mx/busca/dataset/programa-sectorial-de-medio-ambiente-y-recursos-naturales>

• Ranck, M., Bowman, R., Weeber, J., Katz, L. y Sullivan, E. (2005). BTEX removal from produced water using surfactant-modified zeolite. *Journal of Environmental Engineering*, 642-647.

• Röling, F., Milner, M., Jones, D., Lee, K., Daniel, F., Swannell, R. y Head, I. (2002). Robust hydrocarbon degradation and dynamics of bacterial communities during nutrient-enhanced oil spill bioremediation. *Applied and Environmental Microbiology*, 5537-5548. doi:10.1128/AEM.68.11.5537-5548.2002

• Romo-Gómez, C., Monks, S., Pulido-Flores, G. y Gordillo-Martínez, A. (2010). Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in superficial water and sediment of lake Tecocomulco, Mexico. *Interciencia*, 905-911.

• Saeed, T. y Al-Mutairi, M. (1999). Chemical composition of the water-soluble fraction of the leaded gasolines in seawater. *Environmental International*, 25(1), 117-129. doi:10.1016/S0160-4120(98)00093-2

• SCT. (2002). *Metodología para saneamiento de acuíferos profundos por derrame de hidrocarburos*. Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte.

• Sekharz, K. y Subramaniam, K. (2014). Detection of Harmful Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylenes (BTEX) Vapors using electrochemical gas sensors. *ECS Electrochem. Lett.* doi:10.1149/2.005402eel

• SEMARNAT. (2016). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales*. SEMARNAT.

• Soto, E., Mazari, M. y Bojórquez, L. A. (2000). Entidades de la zona metropolitana de la Ciudad de México promueven a la contaminación de agua subterránea. *Investigaciones Geográficas-Boletín del Instituto de Geografía UNAM, México*, 60-75.

• Spiker, R. y Morris, G. (2001). Hygiene, Solvents and industrial. En R. Spiker y G. Morris, *Hayes' Principles and Methods of Toxicology* (pp. 552-553). EE. UU.: Taylor and Francis.

• Su, F., Lu, C. y Tai, J. (2016). Separation of benzene, toluene, ethylbenzene and p-Xylene from aqueous solutions by carbon nanotubes/ polyvinylidene fluoride nanocomposite membrane. *Journal of Water Resource and Protection*, 913-928. doi:10.4236/jwarp.2016.810075

• Thapa, B., Kumar, K. y Ghimire, A. (2012). A Review on bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminants in soil. *Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology*, 164-170.

• Thobeka, P. M. y Sudesh, R. (2017). Investigation of BTEX compounds adsorption onto polystyrenic resin. *South African Journal of Chemical Engineering*, 23, 71-80. doi:10.1016/j.sajce.2017.03.001

• US EPA. (1994). *National primary drinking water standards*. EE. UU.: Office of Water. Obtenido de <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations#one>

• Vidali, M. (2001). Bioremediation. An overview. *Pure Appl. Chem*, 73(7), 1163-1172. doi:10.1351/pac200173071163

• Wang, N., Zhu, L., Wang, D., Wang, M., Lin, Z. y Tang, H. (2010). Wang et al. (2010) highlighted that magnetism of iron nanoparticles made them viable agents for the removal of organic pollutants in polluted media. *Ultrasonics Sonochem*, 526-533. doi:10.1016/j.ultsonch.2009.11.001

• WHO, W. (2011). *Guidelines for drinking-water quality - 4th ed*. Geneva, Switzerland: World Health Organization.

• Zhang, Y., Mu, Y., Liang, P., Xu, Z., Liu, J., Zhang, H., . . . Gao, J. (2012). Atmospheric BTEX and carbonyls during summer seasons of 2008-2010 in Beijing. *Atmospheric Environment*, 186-191. doi:10.1016/j.atmosenv.2012.06.030