



The microorganisms as an alternative approach in remediation of hydrocarbon-contaminated

Los microorganismos como una alternativa para la remediación de contaminación por hidrocarburos

Sicar Domínguez-Sánchez, Humberto Martínez-Montoya, María Cristina Hernández-Jiménez, Héctor Fabián Torres-Rodríguez, Guadalupe Rodríguez-Castillejos*

Universidad Autónoma de Tamaulipas, Unidad Académica Multidisciplinaria Reynosa Aztatlán. Calle 16 y Lago de Chapala SN. 88740, Reynosa, Tamaulipas, Mexico.

*Corresponding author

E-mail address: gcastillejos@uat.edu.mx (G. Rodríguez-Castillejos)

Article history:

Received: 23 April 2018 / Received in revised form: 2 August 2018 / Accepted: 2 August 2018 / Published online: 1 October 2018.

<https://doi.org/10.29267/mxjb.2018.3.4.70>

ABSTRACT

Environmental pollution is one of the biggest concerns facing humanity today, some compounds can be present in soil and aquifers for long periods of time. Additionally, its harmful effects on human health are well known; the environment is capable to self-restore contaminates areas in small concentrations, however those natural limits of degradation have been exceeded. Thus, its important to implement remediation technologies to treat soils with toxic waste, such as oil derivatives. A wide number of remediation using microorganisms have been evaluated and it is known that microorganisms perform degradation of toxic compounds either alone or in consortiums of multiple organisms.

Keywords: Bioremediation, Hydrocarbons, Petroleum, Pollution.

RESUMEN

La contaminación es uno de los problemas más grandes a los que se enfrenta la humanidad actualmente; algunos compuestos pueden almacenarse por largos períodos en el suelo y mantos acuíferos. Además, los efectos nocivos sobre la salud humana son bien conocidos; el medio ambiente tiene la capacidad de restaurar las áreas contaminadas en bajas

concentraciones; sin embargo, se han superado los límites naturales de degradación. Por ello, es importante la implementación de tecnologías de remediación para tratar suelos con desechos tóxicos, como los derivados del petróleo. Se han evaluado diversos métodos de remediación que utilizan microorganismos, y se sabe que estos degradan compuestos tóxicos solos o en consorcios de organismos múltiples.

Palabras clave: Biorremediación, Contaminación, Hidrocarburos, Petróleo.

1. INTRODUCCIÓN

El término contaminación puede definirse como la introducción al ambiente de un compuesto, en cantidad tal que incrementa su concentración natural y que excede la capacidad de la naturaleza para degradarlo y reincorporarlo a los ciclos de transformación de la materia y energía ambiental (Fernández *et al.* 2007). El incremento de diversos compuestos tóxicos se debe a su lenta degradación y la falta de un manejo adecuado de los residuos peligrosos (Salinas-Martínez *et al.* 2010). El comportamiento de los contaminantes en el ambiente está en función de sus características fisicoquímicas, en las que se incluyen principalmente densidad, solubilidad, viscosidad, además de las características del suelo o el medio en el que se encuentre (Kisic *et al.* 2009; Corredor *et al.* 2013). Dentro de los principales contaminantes ambientales se encuentra el petróleo; la contaminación de suelos representa un riesgo para la salud humana y ambiental, ya que se ha demostrado que los hidrocarburos tienen efectos mutagénicos y cancerígenos; estos compuestos son altamente hidrofóbicos, por lo que se absorben fácilmente en el tracto gastrointestinal; así mismo a mayor número de anillos de benceno, mayor es la toxicidad (Bamforth y Singleton 2005; Gan *et al.* 2009). Cuando la cantidad de petróleo en el ambiente es mayor de la que puede ser reciclada, tiene un impacto negativo (Rodríguez 2003), y entre sus componentes existen altas concentraciones de sustancias altamente tóxicas como benceno, tolueno, xilenos, naftaleno, fenantreno, fenol, y tolueno (Das & Chandran 2011). Los efectos dependen del tiempo de exposición, dosis, vía de entrada, tipo de compuesto químico, edad, condición de salud. A corto plazo se ha observado irritación de piel y ojos, náuseas, vómito, diarrea e incluso deterioro pulmonar y efectos trombóticos. Mientras que, la exposición prolongada se ha relacionado con un incremento de cáncer de piel, vejiga, pulmón (Kim *et al.* 2013).

Debido a las malas prácticas de su uso así como el mal manejo de los desechos, o la falta de planeación, han ocurrido diversos derrames de crudo; esto altera además el equilibrio ecológico de la zona afectada. Por ejemplo, se ha documentado que los derrames petroleros cercanos a la costa Antártica han provocado efectos en las comunidades microbianas de los suelos libres de hielo cercanos a los derrames incrementando los grupos microbianos degradadores (Aislabie *et al.* 2001). En México, la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA 2014), reportó del 2010 al 2014 un total de 93.32 de miles de barriles (Mb) de petróleo fueron derramados en suelo y afluentes de agua en los estados de Nuevo León, Tamaulipas, Veracruz, Chiapas, Tabasco, Puebla y Campeche. Estos derrames han provocado una serie de emergencias ambientales a lo largo de los últimos años, las cuales han contribuido a la contaminación acumulativa tanto en suelo como en agua, derrame e incendio de petróleo crudo del Pozo Ixtoc en la Sonda de Campeche (1979), derrame y explosión de la terminal de PEMEX, Satélite Norte, en San Juan

Ixhuatepec, Estado de México (1996); derrame y explosión de crudo en San Martín Texmelucan, Puebla (2010). Los derrames de petróleo y los procedentes de las minas están asociados con materiales peligrosos; las consecuencias se convierten en pérdidas humanas, graves daños al medio ambiente y cuantiosas pérdidas materiales. Por lo anterior, se han establecido los límites máximos permisibles de diferentes contaminantes en suelos de acuerdo al uso que tienen; dividiéndose en suelos de uso industrial, residencial comercial y agrícola, forestal, recreativo y de conservación; siendo los niveles permitidos mayores en los de uso industrial (Tabla 1). Debido al alto índice de contaminaciones, las investigaciones van dirigidas al descubrimiento de nuevos microorganismos y enzimas capaces de desdoblar sustancias hidrocarbonadas y potenciar la inmovilización de sus productos en el suelo implementándose tecnologías de biorremediación (Hawari *et al.* 2000; Mulligan *et al.* 2001).

2. DEGRADACIÓN DE HIDROCARBUROS EN EL AMBIENTE

La degradación de un elemento contaminante ocurre cuando hay una modificación interna o por pérdida de parte de sus elementos, particularmente orgánicos; este proceso puede involucrar procesos físicos, químicos y biológicos (Moreno *et al.* 2004; Bamforth & Singleton 2005). La degradación física, se puede interpretar como la producción de cambios adversos en el suelo que afectan las condiciones físicas relacionadas con el desplazamiento del aire, del agua y nutrientes; este efecto puede darse en la superficie o de forma sub-superficial. La degradación química, se asocia con la degradación biológica, dándose en condiciones extremas, al agotarse los nutrientes y acidificarse el suelo, dando como consecuencia el agotamiento de la materia orgánica. La biológica involucra hidrólisis y oxidación del material (Das & Chandran 2011; Thapa *et al.* 2012). La degradación biológica, conocida también como biodegradación, es la descomposición natural y no contaminante de una sustancia o producto por la acción de agentes microbianos, haciendo que se pierdan por acción biológica, características esenciales de los compuestos que lo caracterizan como tóxicos, se ha demostrado que sus características metabólicas les permiten asimilar estos sustratos complejos (Rodríguez 2003; Moreno *et al.* 2004; Hesham *et al.* 2014). Los hidrocarburos biodegradables pueden sufrir cambios considerables en su estructura química bajo condiciones ambientales específicas por efecto de microorganismos; esto puede resultar en una transformación a sustancias de carácter menos tóxico o bien convirtiéndolas en inocuas para el medio ambiente y la salud humana.

3. TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS

El concepto de remediación hace referencia a la aplicación de estrategias para evitar o disminuir el daño causado por diversos agentes contaminantes. Los tratamientos físicos y/o químicos solo se aplican en ciertos casos y como primera acción de emergencia a fin de remover grandes masas de contaminantes, a causa de su elevado costo y la perturbación adicional que generan sobre la zona bajo tratamiento. Algunos de estos métodos destruyen el suelo y otros alteran sus características de manera irreversible. Para la remediación de un suelo contaminado, deben tomarse en cuenta el tipo de contaminante, tipo de suelo, localización y aplicabilidad de la tecnología deseada. Antes que nada, las características

físicas y químicas del contaminante determinan la manera en que debe tratarse; además, dichas propiedades determinan en parte la movilidad del contaminante y si éste es o no persistente en el ambiente. Una de las técnicas convencionales más utilizadas es la desorción térmica, esta es un tratamiento térmico a temperaturas que causen su volatilización y por tanto el contaminante se separe del suelo (Li *et al.* 2012; Sui *et al.* 2014; Kuppusamy *et al.* 2017). También puede aplicarse el lavado, que consiste en la remoción de contaminantes del suelo tratándolo con surfactantes químicos biodegradables o agua (Von Lau *et al.* 2014). Otro método, es la oxidación química que es un método *in situ* el cual consiste en la oxidación de los contaminantes orgánicos utilizando oxidantes fuertes (Corona-Ramírez & Iturbe-Argüelles 2005). En lo referente a la extracción orgánica en fase sólida, este es un método aplicable *ex-situ* para el tratamiento de suelos contaminados con sustancias orgánicas, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), los bifenilos policlorados (PCBs) y otros compuestos poco solubles en agua (Rehmann *et al.* 2008). Puede aplicarse también extracción de contaminantes con co-solventes, esta es una tecnología que permite la remediación de suelos y aguas subterráneas contaminadas mediante la inyección de agua y un co-solvente, comúnmente un alcohol (etanol, metanol o isopropanol), en el área contaminada (Gan *et al.* 2009). La mayoría de estas técnicas requiere de grandes inversiones para su aplicación en sitios a remediar. Algunas de ellas no resultan en la completa eliminación de los contaminantes, por lo que han sido sustituidas (o complementadas) por tratamientos biológicos compatibles con el medio ambiente y que podrían lograr la eliminación de fracciones de los contaminantes que no pueden ser removidos por métodos físicos. Todos estos tratamientos tienen ventajas y desventajas (Tabla 2), debe analizarse las condiciones del suelo, ambiente y nivel de contaminación para aplicar la técnica más conveniente.

Tabla 2. Ventajas y desventajas de diferentes tecnologías de remediación para suelos contaminados.

Tipo de método de extracción	Fundamento	Ventajas	Desventajas
Fisicoquímico	Lavado a alta presión, utilización de líquidos o disolventes; no destruye el contaminante, sino lo concentra para facilitar la extracción.	Periodos cortos, eficiencia del 62 % a 97 % de eliminación de contaminantes, dependiendo la técnica a utilizar.	Destrucción de poblaciones microbianas, son métodos tediosos, requieren mayor tiempo, baja eficiencia en eliminación del contaminante.
Químico	Cambio en la estructura química del compuesto, oxidación química de los compuestos (peróxido de hidrogeno, reactivo de fenton, persulfato,	Bajo costos, lapsos de tiempo cortos, bajo consumo de combustible e infraestructura, efectividad, disminución de	Tratamiento o manejo de los residuos/desechos recuperados, gestión de permisos, daños a la microbiota del suelo, depende de las características del suelo y

	peroximonosulfato, ozono y permanganato).	mermas del reactivo sanante, baja dispersión de contaminantes.	del compuesto contaminante, dosis controladas.
Tratamiento térmico	Incremento de la volatilización e inmovilización de los componentes químicos del suelo.	Tiempos cortos, eficiencia de un 70 % a 80 % de eliminación.	Es el tipo de tratamientos más costoso.
Tratamiento biológico(Biorremediación)	Aprovechamiento de las capacidades metabólicas/degradadoras de seres vivos (plantas o microorganismos) para degradar o transformar los contaminantes a compuestos inocuos.	-Son efectivos en cuanto a costos -Son tecnologías más benéficas para el ambiente -Los contaminantes generalmente son destruidos para el ambiente -Los contaminantes generalmente son destruidos -Se requiere un mínimo o ningún tratamiento posterior. Los porcentajes de eficiencia varían según el ser vivo utilizado.	Requieren mayores tiempos de tratamiento. Es necesario verificar la toxicidad de intermediarios y/o productos. No pueden emplearse si el tipo de suelo no favorece el crecimiento microbiano

4. MICROORGANISMOS COMO AGENTES BIORREMEDIADORES

La biodegradación se refiere a la descomposición de los compuestos con potencial tóxico la cual es llevada a cabo por agentes biológicos. En este sentido, la biodegradación de muchos componentes de los hidrocarburos del petróleo ha sido reportada en ecosistemas terrestres y acuáticos, con una amplia variedad de condiciones (Margesin & Schinner 2001; Dastgheib et al., 2012). Se ha estudiado la dinámica de distintos microorganismos como agentes capaces de degradar compuestos complejos tóxicos constituyentes de los hidrocarburos, como los asociados a plantas (Mendez & Maier 2008), consorcios microbianos (Watanabe 2001), bacterias, mohos (Bamforth y Singleton 2005) y levaduras (Zinjarde & Pant 2002). Estos microorganismos, ya sea en consorcios o de manera individual, han demostrado su eficacia para convertir compuestos complejos tóxicos en compuestos sencillos o inocuos, hasta el caso de los compuestos xenobioticos (Janssen *et al.* 2005). El poder de biodegradación bacteriana se atribuye a la presencia de genes metabólicos para degradar

hidrocarburos alifáticos y aromáticos; además de la capacidad de algunos géneros de producir biosurfactantes y biopelículas (Susilaningih *et al.* 2013). Las bacterias aerobias utilizan el oxígeno como aceptor de electrones lo que provoca la descomposición de la materia, orgánica e inorgánica, en compuestos más pequeños, que incluso pueden llegar hasta dióxido de carbono y agua como producto final (Gan *et al.* 2009). En cuanto a las levaduras, se ha reportado que los géneros *Candida*, *Rhodotorula* y *Saccharomyces* tienen un alto potencial de degradación. Además de las levaduras, los hongos filamentosos o mohos, han mostrado ser importantes en la degradación de fracciones C12-C16 de hidrocarburos; estos son capaces de utilizar a los contaminantes como única fuente de carbono. Dentro de este grupo destacan los géneros *Aspergillus*, *Penicillium*, *Paecilomyces*, *Fusarium*, *Cladosporium*, *Trichoderma* (Marinescu *et al.* 2017). Los derrames de petróleo aunado a las actividades humanas ocasionan cambios en la estructura de las comunidades microbianas de los sitios afectados (Liang *et al.* 2011), dichas comunidades están compuestas por miles de bacterias y hongos de una gran diversidad taxonómica; se ha estimado que la comunidad microbiana en solo un gramo de suelo puede contener más de mil especies bacterianas (Rossello-Mora y Amann 2001; Malik *et al.* 2008). Adicionalmente, los derrames han causado gran pérdida de biodiversidad; por ello es importante tener estrategias que reduzcan el riesgo de derrames y minimizar los impactos negativos que estas han causado (Azevedo-Santos *et al.* 2016). Hasta hace algunos años la manera de determinar las especies microbianas presentes en una muestra de suelo era a través del cultivo e identificación de los microorganismos, esto limitaba grandemente la diversidad de especies que se podían identificar a aquellas que eran cultivables. Actualmente el desarrollo de las nuevas técnicas de secuenciación masiva ha permitido identificar el metagenoma de muestras de suelo contaminados con petróleo o aceite lo cual ha permitido identificar bacterias no cultivables que potencialmente pueden ser utilizadas en proyectos de biorremediación (Figura 1) (Liang *et al.* 2011; Yergeau *et al.* 2012).

La biorremediación está descrita como la utilización de microorganismos para degradar contaminantes que representan un riesgo para la salud humana o para el ecosistema y puede ser el resultado de la actividad de múltiples microorganismos. En abril del 2010, se registró un derrame de petróleo de más de 4 millones de barriles en el Golfo de México en la plataforma *Deepwater Horizon* (DWH); los estudios han demostrado que los microorganismos nativos ayudaron a contrarrestar en cierta medida los efectos adversos; sin embargo, no degradan todos los componentes del petróleo y la persistencia de algunos de ellos es la causa graves problemas ambientales.

Mason *et al.* (2014), realizaron un análisis metagenómico de sedimentos contaminados durante el derrame de DWH y encontraron un aumento en la abundancia de genes implicados en las vías de desnitrificación por encima de los valores de referencia marcados por la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés: Environmental Protection Agency); destacando las bacterias de los grupos de *Gammaproteobacterium* y *Colwellia*. Se han reportado diversos géneros bacterianos con capacidades metabólicas degradadoras de hidrocarburos (Widada *et al.* 2002); dentro de los principalmente se encuentran bacterias de los géneros *Pseudomonas* y *Mycobacterium*, las cuales son capaces de transformar y degradar los HAP. Por otro lado, King *et al.* (2013) analizando la secuencia del 16S rRNA encontraron 11 diferentes géneros de bacterias oxidantes de hidrocarburos conocidos, entre ellas *Alcanivorax*, *Cycloclasticus*, *Marinobacter*, *Oleiphilus*, *Oleispira*, *Pseudomonas* y *Vibrio*; así como 13 géneros metanotróficos y metilotróficos. Otros estudios han reportado bacterias de los géneros, *Colwellia*,

Cycloclasticus, *Oceanospirillales*, *Methylobacter*, and *Methylococcus* después del derrame de la plataforma DWH; todas estas conocidas por capacidad degradadora de HAP. Estos resultados indican la importancia de los microorganismos en la remediación de áreas contaminadas y muestran que la remediación intrínseca (llevada a cabo por microorganismos nativos) es esencial para el ambiente (Hazen *et al.* 2010).

Mukherjee y Bordoloi (2012), evaluaron la eficacia de un consorcio bacteriano constituido por cepas de *Bacillus subtilis* DM-04 y *Pseudomonas aeruginosa* en suelo contaminado con petróleo; el experimento se llevó a cabo por 180 d bajo condiciones de laboratorio; al mismo tiempo antes y después del tratamiento con consorcio microbiano, se evaluó la germinación y crecimiento de semillas de leguminosas en los suelos, antes y después de la biorremediación. Se encontró una reducción de 76 % de degradación en comparación con el suelo de control (3.6 % de degradación). Se observó que las semillas no podían germinar en el suelo contaminado con petróleo, pero sí germinaron en el suelo tratado con el consorcio. Por otro lado, Verma *et al.* (2006) aislaron bacterias de los géneros *Bacillus*, *Acinetobacter* y *Pseudomona*

, de suelo contaminado con petróleo en India. Se encontró que el género *Bacillus* sp tuvo la tasa de degradación más alta con un 59 %, seguida de *Acinetobacter* sp. (37 %) y *Pseudomona* sp. (35 %). Widada *et al.* 2002 aislaron 19 bacterias degradadoras de HAP de muestras ambientales en Kuwait, Indonesia, Tailandia y Japón; esto se llevó a cabo utilizan por enriquecimiento con naftaleno y/o fenantreno como única fuente de carbono. La determinación de la capacidad de los aislados para utilizar HAP y sus presuntos intermedios catabólicos sugiere que los aislamientos mostraron múltiples fenotipos en términos de utilización y vías de degradación; los resultados que se obtuvieron en los distintos grupos aislados y sometidos a resistencia de degradación sugieren que las bacterias degradantes de HAP son diversas, y que todavía hay géneros y especies bacterianas degradantes que no han sido identificadas. Bracho *et al.* (2004), evaluaron la capacidad degradadora de 14 cepas de *Pseudomona* sp en HAP; encontraron que el total de cepas estudiadas degradaron naftaleno, antraceno, fenantreno y dibenzotiofeno; lo que sugiere que tienen una alta capacidad enzimática para metabolizar dichos compuestos. De-la-Cueva *et al.* 2016 estudiaron la población bacteriana de suelos contaminados por hidrocarburos procedentes de Durango, México; encontraron microorganismos de los géneros *Acinetobacter*, *Pedomicrobium*, *Halomonas*, *Rhizobium*, *Cryobacterium*, *Pseudomonas*, *Lysobacter*, *Thermomonas* y *Stenotrophomonas*. *Acinetobacter*, *Pedomicrobium* y *Rhizobium*. Además evaluaron el uso de un agente biosurfactante (Tween 80) y obtuvieron un porcentaje de degradación máxima de 61.5 % con 0.5 % de adición de tensoactivo. Algunos estudios también han demostrado que el uso de algunas plantas, como la alfalfa, con bacterias aumenta la eficiencia de remediación (Agnello *et al.* 2016). Los resultados de las investigaciones en distintos sitios y circunstancias dan prueba básica que existen una gran diversidad de microorganismos degradadores de hidrocarburos que aún no han sido identificados.

Los hongos tienen algunas ventajas sobre las bacterias en su papel de biodegradadores, las hifas fúngicas (de hongos filamentosos) aunado a la secreción de enzimas, facilitan la penetración en el suelo contaminado; dentro de estas enzimas se ha encontrado que oxidorreductasas, lacasas y peroxidasas juegan un papel muy importante en la degradación de hidrocarburos (Balaji *et al.* 2014). Por ejemplo, *Trichoderma* sp. es reconocido por su capacidad de degradar hidrocarburos aromáticos policíclicos, se confirmó que la cepa *T. longibrachiatum* Evx1 aislada de suelos, es un buen candidato para eliminar contaminación

por mezcla de hidrocarburos complejos, y que el microorganismo permanecía por más de 30 d en el suelo (Andreolli *et al.* 2016). Balaji *et al.* (2014) aislaron 21 hongos como potenciales degradadores de hidrocarburos, a partir de suelo contaminado, estos pertenecían a los géneros *Aspergillus*, *Curvularia*, *Drechslera*, *Fusarium*, *Lasiodiplodia*, *Mucor*, *Penicillium*, *Rhizopus*, *Trichoderma*. Además estudiaron la actividad lipasa, la cual es importante en la degradación, en medios de cultivo cuya única fuente eran HAP; encontrado que esta fue mayor para los hongos *P. chrysogenum*, *M. racemosus* y *L. theobromae* VBE1. Mao y Guan (2016), reportan que la cepa PZ-4 identificada como *Scopulariopsis brevicaulis* y aislada de suelo contaminado por HAP, fue capaz de eliminar en 30 d en un medio líquido hasta un 82 % de benzo[a]pireno, 62 % de fenantreno y 62 % de flúoranteno. Posteriormente su potencial como biodegradador fue evaluado en suelo contaminado, encontrándose que a los 28 días el 77 % de los HAP totales había sido eliminados.

Por otro lado, las levaduras son ampliamente utilizadas en biotecnología, tienen gran participación en el ámbito industrial, clínico y ambiental. Varios estudios han señalado el papel que realizan las levaduras en consorcios microbianos para la degradación de hidrocarburos (Csutak *et al.* 2010; Hesham *et al.* 2014). Estos microorganismos tienen capacidad de adaptación a condiciones extremas de pH, temperaturas, niveles de contaminantes orgánicos e inorgánicos; por ello tienen un gran potencial para remediación de ambientes contaminados (Trama *et al.* 2014). Se ha demostrado su eficacia en la biodegradación de componentes del petróleo, compuestos aromáticos, polares y de alto peso molecular; sus características metabólicas les permiten explorar, desintoxicar y sobrevivir en sustratos complejos (Hesham *et al.* 2014).

Las levaduras son capaces de degradar compuestos alifáticos, alcanos con cadenas de carbono C10 - C18, hidrocarburos saturados que son transformados en cadenas menos saturadas y también son capaces de degradar alcanos ramificados y lineales (Csutak *et al.* 2010). Joo *et al.* (2008), evaluaron el poder de degradación de *Candida catenulata* en suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo, encontraron una disminución de contaminantes de 84 % después de 13 d de inoculación. Por otro lado, Salinas-Martínez *et al.* (2010) confirmaron la participación efectiva de levaduras del género *Candida albicans* en la degradación de HAP, con resultados de un 95 % a 97 % de descontaminación en los suelos como fuente de carbono. Las levaduras conocidas como “levaduras negras” de la familia *Herpotrichiellaceae* son reconocidas por su capacidad de crecimiento en ambientes altamente contaminados con HAP; Zhao *et al.* (2010), evaluaron la capacidad degradadora de diferentes hidrocarburos de levaduras del género *Exophiala* aisladas de bayas silvestres, suelo rico en guano y suelos cercanos a ferrocarriles contaminados con aceite. Los aislados fueron seleccionados en medios enriquecidos con tolueno, xileno y benceno; se reportaron aislados de las especies *E. xenobiotica*, *E. bergeri*, *Exophiala spinifera*, *E. oligosperma*, *E. heteromorpha*, *E. dermatitidis*, *E. lecanii-corni*; todos fueron capaces de crecer en presencia de los contaminantes. Sin embargo, debe evaluarse el potencial uso de estas levaduras ya que se han reportado como patógenos humanos; pero los resultados demuestran la importancia de los microorganismos en la remediación. En otro estudio, Zinjarde y Pant (2002) aislaron las levaduras *C. parapsilosis*, *C. albicans*, *C. guilliermondii*, *C. tropicalis* y *Yarrowia lipolytica*, de muestras de lodo marino contaminado con hidrocarburos; una vez que fueron identificadas se evaluó su potencial de degradación de las diferentes fracciones de petróleo, siendo *Y. lipolytica* la que mostró mayor potencial degradador con un 78 % de la fracción alifática (78 %). Aunque no todos los

compuestos orgánicos son susceptibles a la biodegradación por los mismos microorganismos, los procesos de bio remediación se han utilizado con éxito para tratar suelos o lodos y sedimentos contaminados.

Las levaduras pueden adaptarse incluso a temperaturas muy bajas como las de los polos; se han reportado levaduras de los géneros *Candida*, *Cryptococcus*, *Rhodotorula*, *Hanseniaspora* y *Saccharomyces*, las cuales han demostrado capacidad de adaptación y desarrollo en lugares como la Antártida; estos géneros han mostrado ser capaces de crecer en presencia de hidrocarburos y sus derivados; actuando además como remediadoras, eliminando o disminuyendo el grado de contaminación en suelos (Buzzini *et al.* 2012).

Se han utilizado distintas técnicas de remediación, las cuales, algunas han ocasionado daños irreversibles al medio ambiente. Otras medidas utilizadas para la remediación de suelos pueden involucrar plantas, bacterias, mohos, levaduras, entre otros; a la utilización de organismos en los procesos de descontaminación se le conoce como biorremediación (Rodríguez 2003; Bamforth y Singleton 2005). Con lo anterior, los derrames de petróleo son considerados producto peligroso no deseado; para eliminar esta contaminación se han utilizado diversos métodos que involucran procesos físicos, químicos y más recientemente el uso de microorganismos o plantas (Rodríguez 2003).

5. CONCLUSIONES

Los microorganismos han demostrado tener amplios usos en la industria debido a su gran capacidad metabólica; pero también se ha encontrado su poder de degradación de diversos contaminantes orgánicos e inorgánicos. Estos microorganismos con potencial de remediación son principalmente bacterias, mohos y levaduras; estos se han adaptado a condiciones extremas de temperatura, pH, así como a la presencia de diferentes contaminantes ambientales. Además diversos estudios han demostrado que estos microorganismos tienen la capacidad genética y bioquímica para degradación de diversos contaminantes, lo cual está determinado por diferentes enzimas presentes en su metabolismo; las cuales pueden estar de manera inactiva si el ambiente no requiere su utilización. Siendo los derrames de petróleo un problema grave de contaminación ambiental en México y el mundo, es importante evaluar a los microorganismos con mayor potencial degradador para que se puedan combinar con las tecnologías ya existentes y mejorar los procesos de descontaminación. Los estudios actuales sugieren el gran potencial de estos microorganismos como agentes de remediación de ambientes contaminados con hidrocarburos y sus derivados.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

REFERENCIAS

Agnello, A. C., Bagard, M., Van Hullebusch, E. D., Esposito, G., & Huguenot, D. 2016. Comparative bioremediation of heavy metals and petroleum hydrocarbons co-contaminated soil by natural attenuation, phytoremediation, bioaugmentation and bioaugmentation-assisted phytoremediation. *Science of the Total Environment* 563, 693-703.

- Andreolli, M., Lampis, S., Brignoli, P., & Vallini, G. 2016. Trichoderma longibrachiatum Evx1 is a fungal biocatalyst suitable for the remediation of soils contaminated with diesel fuel and polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environmental Science and Pollution Research* 23(9), 9134-9143.
- Aislabie, J., Fraser, R., Duncan, S., & Farrell, R. L. 2001. Effects of oil spills on microbial heterotrophs in Antarctic soils. *Polar Biology*, 24(5), 308-313.
- Azevedo-Santos, V. M., Garcia-Ayala, J. R., Fearnside, P. M., Esteves, F. A., Pelicice, F. M., Laurance, W. F., & Benine, R. C. 2016. Amazon aquatic biodiversity imperiled by oil spills. *Biodiversity and conservation* 25(13), 2831-2834.
- Balaji, V., Arulazhagan, P., & Ebenezer, P. 2014. Enzymatic bioremediation of polyaromatic hydrocarbons by fungal consortia enriched from petroleum contaminated soil and oil seeds. *Journal of environmental biology* 35(3), 521-529.
- Bamforth, S. M., & Singleton, I. 2005. Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons: current knowledge and future directions. *Journal of chemical technology and biotechnology* 80(7), 723-736.
- Bracho, M., Díaz, L., & Soto, L. M. 2004. Biodegradación de hidrocarburos aromáticos policíclicos y heterocíclicos por Pseudomonas spp. *Ciencia* 12(4), 269-275.
- Buzzini, P., Branda, E., Goretti, M., & Turchetti, B. 2012. Psychrophilic yeasts from worldwide glacial habitats: diversity, adaptation strategies and biotechnological potential. *FEMS microbiology ecology* 82(2), 217-241.
- Corona Ramírez, L., & Iturbe Argúelles, R. 2005. Atenuación natural en suelos contaminados con hidrocarburos. *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, 6(2), 119-126.
- Corredor, B. B., Mesa, G. P., Gallo, S. A. C., Pino, N. 2013. Biorremediación de suelo contaminado con pesticidas: caso DDT. *Gestión y Ambiente*, 16(3), 119-135.
- Csutak, O., Stoica, I., Ghindea, R., Tanase, A. M., Vassu, T. A. 2010. Insights on yeast bioremediation processes. *Romanian Biotechnological Letters*, 15(2), 5066-5071.
- Das, N., & Chandran, P. 2011. Microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants: an overview. *Biotechnology research international* 2011, 1-13.
- Dastgheib, S. M. M., Amoozegar, M. A., Khajeh, K., Shavandi, M., Ventosa, A. 2012. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by a halophilic microbial consortium. *Applied microbiology and biotechnology*, 95(3), 789-798.

de la Cueva, S. C., Rodríguez, C. H., Cruz, N. O. S., Contreras, J. A. R., & Miranda, J. L. 2016. Changes in bacterial populations during bioremediation of soil contaminated with petroleum hydrocarbons. *Water, Air, & Soil Pollution*, 227(3),1-12.

Fernández, D. S., de Molina, A. H. G., de Molina Navarro, M. L. G., & Santos, A. O. 2007. La protesta campesina como protesta ambiental, siglos XVIII-XX. *Historia agraria: Revista de agricultura e historia rural*, 42, 277-302.

Frutos, F. J. G., Escolano, O., García, S., Babín, M., & Fernández, M. D. 2010. Bioventing remediation and ecotoxicity evaluation of phenanthrene-contaminated soil. *Journal of hazardous materials* 183(1-3), 806-813.

Gan, S., Lau, E. V., & Ng, H. K. 2009. Remediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). *Journal of Hazardous Materials* 172(2-3), 532-549.

Hawari, J., Beaudet, S., Halasz, A., Thiboutot, S., & Ampleman, G. 2000. Microbial degradation of explosives: biotransformation versus mineralization. *Applied Microbiology and Biotechnology* 54(5), 605-618.

Hazen, T. C., Dubinsky, E. A., DeSantis, T. Z., Andersen, G. L., Piceno, Y. M., Singh, N., ... & Stringfellow, W. T. 2010. Deep-sea oil plume enriches indigenous oil-degrading bacteria. *Science* 330(6001), 204-208.

Hesham, A. E. L., Mawad, A. M., Mostafa, Y. M., & Shoreit, A. 2014. Biodegradation ability and catabolic genes of petroleum-degrading *Sphingomonas koreensis* strain ASU-06 isolated from Egyptian oily soil. *BioMed research international* 2014,1-10.

Janssen, D. B., Dinkla, I. J., Poelarends, G. J., & Terpstra, P. 2005. Bacterial degradation of xenobiotic compounds: evolution and distribution of novel enzyme activities. *Environmental Microbiology* 7(12), 1868-1882.

Jansson, J. 2011. Towards terra terra: Terabase sequencing of terrestrial metagenomics. *Microbe*, 6, 1-6.

Joo, H. S., Ndegwa, P. M., Shoda, M., & Phae, C. G. 2008. Bioremediation of oil-contaminated soil using *Candida catenulata* and food waste. *Environmental pollution* 156(3), 891-896.

Kim, K. H., Jahan, S. A., Kabir, E., & Brown, R. J. 2013. A review of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their human health effects. *Environment international* 60, 71-80.

King, G. M., Smith, C., Tolar, B., & Hollibaugh, J. T. 2013. Analysis of composition and structure of coastal to mesopelagic bacterioplankton communities in the northern gulf of Mexico. *Frontiers in microbiology*, 3, 438 1-14.

- Kisic, I., Mesic, S., Basic, F., Brkic, V., Mesic, M., Durn, G., ... & Bertovic, L. 2009. The effect of drilling fluids and crude oil on some chemical characteristics of soil and crops. *Geoderma* 149(3-4), 209-216.
- Kuppusamy, S., Thavamani, P., Venkateswarlu, K., Lee, Y. B., Naidu, R., & Megharaj, M. 2017. Remediation approaches for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contaminated soils: Technological constraints, emerging trends and future directions. *Chemosphere* 168, 944-968.
- Li, X., Du, Y., Wu, G., Li, Z., Li, H., & Sui, H. 2012. Solvent extraction for heavy crude oil removal from contaminated soils. *Chemosphere* 88(2), 245-249.
- Liang, Y., Van Nostrand, J. D., Deng, Y., He, Z., Wu, L., Zhang, X., ... & Zhou, J. 2011. Functional gene diversity of soil microbial communities from five oil-contaminated fields in China. *The ISME journal* 5(3), 403.
- Malik, S., Beer, M., Megharaj, M., & Naidu, R. 2008. The use of molecular techniques to characterize the microbial communities in contaminated soil and water. *Environment international* 34(2), 265-276.
- Mao, J., & Guan, W. 2016. Fungal degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) by *Scopulariopsis brevicaulis* and its application in bioremediation of PAH-contaminated soil. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science* 66(5), 399-405.
- Margesin, R., & Schinner, F. 2001. Biodegradation and bioremediation of hydrocarbons in extreme environments. *Applied microbiology and biotechnology* 56(5-6), 650-663.
- Marinescu, M., Lacatusu, A., Gament, E., Plopeanu, G., Carabulea, V., & Marinescu, M. 2017. A review of biological methods to remediate crude oil polluted soil. *Annals of the University of Craiova-Agriculture, Montanology, Cadastre Series* 46(1), 35-340.
- Mason, O. U., Scott, N. M., Gonzalez, A., Robbins-Pianka, A., Bælum, J., Kimbrel, J., ... & Fortney, J. L. 2014. Metagenomics reveals sediment microbial community response to Deepwater Horizon oil spill. *The ISME journal* 8(7), 1464.
- Mendez, M. O., & Maier, R. M. 2008. Phytoremediation of mine tailings in temperate and arid environments. *Reviews in Environmental Science and bio/technology* 7(1), 47-59.
- Moreno, C. M., Becerra, A. G., & Santos, M. J. B. 2004. Tratamientos biológicos de suelos contaminados: contaminación por hidrocarburos. Aplicaciones de hongos en tratamientos de biorrecuperación. *Rev Iberoam Micol* 21(1), 103-120
- Mukherjee, A. K., & Bordoloi, N. K. 2012. Biodegradation of benzene, toluene, and xylene (BTX) in liquid culture and in soil by *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas aeruginosa* strains and a formulated bacterial consortium. *Environmental Science and Pollution Research* 19(8), 3380-3388.

Mulligan, C. N., Yong, R. N., & Gibbs, B. F. 2001. Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: an evaluation. *Engineering geology* 60(1-4), 193-207.

PROFEPA. 2014. Reporte de derrames de petróleo crudo al primer semestre de 2014. México. www.cofemersimir.gob.mx (Consultado el 10 de febrero del 2018).

Rehmann, L., Prpich, G. P., & Daugulis, A. J. 2008. Remediation of PAH contaminated soils: Application of a solid-liquid two-phase partitioning bioreactor. *Chemosphere* 73(5), 798-804.

Rodríguez, D. T. 2003. El papel de los microorganismos en la biodegradación de compuestos tóxicos. *Revista Ecosistemas* 12(2)1-6.

Rosselló-Mora, R., & Amann, R. 2001. The species concept for prokaryotes. *FEMS microbiology reviews* 25(1), 39-67.

Salinas-Martínez, A., Hernández-Carbajal G. R., De-los-Santos-Córdoba M., López-Miranda J., O. Soto-Cruz N., Pérez-Andrade H., and Medrano-Roldan H. F. D. 2010. Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de Petróleo. *Ciencia, Tecnología e Innovación para el Desarrollo de México* 2:1-7.

SEMARNAT-SSA. 2012. Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación in N. O. M. NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012.

Sui, H., Hua, Z., Li, X., Li, H., & Wu, G. 2014. Influence of soil and hydrocarbon properties on the solvent extraction of high-concentration weathered petroleum from contaminated soils. *Environmental Science and Pollution Research* 21(9), 5774-5784.

Susilaningsih, D., Okazaki, F., Yopi, Y., Widyastuti, Y., & Harayama, S. 2013. Isolation and Screening of Surfactant-producing Bacteria from Indonesian Marine Environments and Its Application on Bioremediation. In *Annales Bogorienses* 17, 45-53.

Thapa, B., Kc, A. K., & Ghimire, A. 2012. A review on bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminants in soil. *Kathmandu university journal of science, engineering and technology* 8(1), 164-170.

Trama, B., Fernandes, J. D. S., Labuto, G., de Oliveira, J. C. F., Viana-Niero, C., Pascon, R. C., & Vallim, M. A. 2014. The evaluation of bioremediation potential of a yeast collection isolated from composting. *Advances in Microbiology* 4(12), 796.

Verma, S., Bhargava, R., & Pruthi, V. 2006. Oily sludge degradation by bacteria from Ankleshwar, India. *International biodeterioration & biodegradation*, 57(4), 207-213.

Von Lau, E., Gan, S., Ng, H. K., & Poh, P. E. 2014. Extraction agents for the removal of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from soil in soil washing technologies. *Environmental pollution* 184, 640-649.

Watanabe, K. 2001. Microorganisms relevant to bioremediation. *Current opinion in biotechnology* 12(3), 237-241.

Wauquier, J. P. 2004. *El refinado del petróleo: petróleo crudo, productos petrolíferos, esquemas de fabricación*. Ediciones Díaz de Santos.

Widada, J., Nojiri, H., Kasuga, K., Yoshida, T., Habe, H., & Omori, T. 2002. Molecular detection and diversity of polycyclic aromatic hydrocarbon-degrading bacteria isolated from geographically diverse sites. *Applied Microbiology and Biotechnology* 58(2), 202-209.

Yergeau, E., Sanschagrín, S., Beaumier, D., & Greer, C. W. 2012. Metagenomic analysis of the bioremediation of diesel-contaminated Canadian high arctic soils. *PloS one* 7(1), e30058.

Zhao, J., Zeng, J., De Hoog, G. S., Attili-Angelis, D., & Prenafeta-Boldú, F. X. 2010. Isolation and identification of black yeasts by enrichment on atmospheres of monoaromatic hydrocarbons. *Microbial ecology* 60(1), 149-156.

Zinjarde, S. S., & Pant, A. A. 2002. Hydrocarbon degraders from tropical marine environments. *Marine pollution bulletin* 44(2), 118-121.