

Importancia de las bacterias nativas de ambientes acuáticos afectados por derrames de petróleo

Importance of native bacteria in aquatic environments affected by oil spills

Rocío del Carmen Castillo-Márquez^{1*}, Jacinto Treviño-Carreón¹, José Alberto López-Santillán¹, Eduardo Osorio-Hernández¹, Wilberth Alfredo Poot-Poot¹, Benigno Estrada-Drouaillet¹

¹División de Estudios de Posgrado e Investigación, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Centro Universitario Adolfo López Mateos, Victoria, Tamaulipas, C.P. 87120, México
Correos electrónicos: a2163010072@alumnos.uat.edu.mx; jatrevino@docentes.uat.edu.mx; jalopez@docentes.uat.edu.mx; eosorio@docentes.uat.edu.mx; wpoot@docentes.uat.edu.mx; benestrada@docentes.uat.edu.mx
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6952-9768>; <https://orcid.org/0000-0001-7945-4010>; <https://orcid.org/0000-0002-6923-3684>; <https://orcid.org/0000-0002-9248-8167>; <https://orcid.org/0000-0002-2973-3289>; <https://orcid.org/0000-0002-0332-5658>

*Autor para correspondencia

Recibido: 7 de julio de 2022
Aceptado: 16 de diciembre de 2022
Publicado: 31 de enero de 2023
<https://doi.org/10.33064/iycuaa2023883999>
e3999

Resumen

Este artículo destaca la importancia en la biorremediación de las bacterias nativas de sitios afectados por derrames de petróleo. Los hidrocarburos liberados en los derrames de petróleo son fuente de contaminación para los ecosistemas acuáticos y terrestres debido a su persistencia en el ambiente además son considerados altamente tóxicos, causando graves daños a la salud humana, así como a la flora y fauna de los sitios afectados. A fin de mitigar los efectos negativos que causa la contaminación por los derrames hidrocarburos se han desarrollado técnicas amigables con el medio ambiente como la biorremediación, que emplea organismos como plantas, hongos y bacterias nativas, como *Pseudomonas*, *Actinobacter*, *Mycobacterium*, *Arthrobacter*, *Bacillus* y *Rhodococcus* capaces de degradar petróleo, diésel y gasolina, ya que producen moléculas que facilitan la degradación de los contaminantes llamadas biosurfactantes, estos cambian las condiciones de la superficie entre el agua y los hidrocarburos permitiéndoles así poder degradar el contaminante.

Palabras clave: agua; biosurfactantes; contaminación; degradación; hidrocarburos; microorganismos.

Abstract

This article highlights the importance of native bacteria in the bioremediation of sites affected by oil spills. Hydrocarbons released in oil spills are a source of contamination for aquatic and terrestrial ecosystems due to their persistence in the environment and are considered highly toxic, causing serious damage to human health as well as to the flora and fauna of the affected sites. In order to mitigate the negative effects caused by oil

spills, environmentally friendly techniques have been developed, such as bioremediation, which uses organisms such as plants, fungi and native bacteria, such as *Pseudomonas*, *Actinobacter*, *Mycobacterium*, *Arthrobacter*, *Bacillus* and *Rhodococcus* capable of degrading oil, diesel and gasoline, as they produce molecules that facilitate the degradation of pollutants called biosurfactants, which change the surface conditions between water and hydrocarbons allowing them to degrade the pollutant.

Keywords: water; biotensioactivos; contaminación; degradación; hidrocarburos; microorganismos.

Introducción

Los derrames de petróleo se derivan de las actividades de la industria petrolera como son la perforación de pozos, el transporte del hidrocarburo y el traslado desde alta mar a tierra firme, estos forman parte de los principales problemas que causan la contaminación de los ecosistemas (Mirjani *et al.*, 2021). Los hidrocarburos de petróleo son compuestos orgánicos persistentes en el ambiente en donde son vertidos; las propiedades físicas que poseen tales como la densidad relativa, la volatilidad, la fluidez y la viscosidad, dificultan su remoción por lo que se han explorado diferentes técnicas que permitan su eliminación para remediar los sitios afectados (De la Huz *et al.*, 2011). Los hidrocarburos también son considerados altamente tóxicos para el hombre, ya que producen irritación en los ojos y piel, así como enfermedades respiratorias, dolor de cabeza, alteraciones en el ADN inclusive provocan diferentes tipos de cáncer (Pérez *et al.*, 2019; Marris *et al.*, 2020). En los ecosistemas acuáticos causan daños funcionales al impedir que se lleven a cabo procesos químicos como la fotosíntesis, ya que cuando se sitúan en el espejo de agua forman una capa superficial que obstruye el paso de la luz solar, alterando la cantidad de oxígeno disuelto; se ha registrado que el hidrocarburo se adhiere al plumaje de las aves acuáticas lo que dificulta su desplazamiento y puede provocar la asfixia e intoxicación al ingerirlo (Viramontes *et al.*, 2020).

En la actualidad se han utilizado distintas técnicas de remediación con el propósito de eliminar estos contaminantes de los sitios afectados; por ejemplo, en la biorremediación se pueden utilizar microorganismos capaces de convertir los hidrocarburos en sustancias como el agua (H₂O) y el dióxido de carbono (CO₂) (Behera *et al.*, 2018). Los microorganismos como algunas especies de bacterias son capaces de utilizar los elementos constituyentes de los hidrocarburos como son carbono (C), nitrógeno (N), oxígeno (O), hidrógeno (H) y azufre (S) como fuente de energía para su crecimiento poblacional por lo que en este artículo se destaca la importancia en la biorremediación de las bacterias nativas de sitios afectados por derrames de petróleo (Viramontes *et al.*, 2020).

Desarrollo

Problemáticas que generan los derrames de hidrocarburos

La contaminación del ambiente por hidrocarburos es un problema a nivel mundial el cual deriva principalmente de los derrames de petróleo producto de algunas actividades como la descarga de aguas residuales con restos del hidrocarburo, fugas en los tanques de almacenamiento y en los oleoductos subterráneos (Varjani y Upasani, 2019).

Una vez que el hidrocarburo contamina un sitio, genera problemas al ser humano, así como a la flora y fauna del sitio (Hoang *et al.*, 2020). La exposición de la fauna acuática a los hidrocarburos es tóxica para estos individuos, ya que se ve afectada la biodiversidad, así como la actividad pesquera debido a que causa alteraciones en el sistema reproductivos de los animales, alteración endocrina, daños en el ADN y malformación en el embrión (Behera *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2021). Las plantas que entran en contacto con el hidrocarburo sufren daños, ya que impide que estas accedan a la luz solar además de no adquirir los nutrientes que necesita lo cual impide su desarrollo (Trukewycz *et al.*, 2019). En la salud humana causa efectos negativos como, dolor de cabeza, irritación de ojos y piel, dolor de garganta, problemas respiratorios, estornudos, tos, congestión nasal, náuseas, vómito, mareos, diarrea, disfunción renal, osteoporosis, diversos tipos de cáncer (de pulmón y nariz), inclusive causa alteraciones en el ADN (Orish, 2021).

Hidrocarburos y sus Compuestos

Los hidrocarburos del petróleo también llamados hidrocarburos totales de petróleo (HTP) son clasificados como contaminantes prioritarios según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés) (Miri *et al.*, 2018). Están formados por dos tipos de compuestos de hidrocarburos que son los hidrocarburos volátiles y los extraíbles del petróleo; en el primer grupo se encuentran los hidrocarburos de cadena pequeña los que tienen de 6 a 10 carbonos como el benceno, el tolueno, el etilbenceno y el xileno y el segundo grupo en donde se encuentran los de cadena larga que tienen de 10 a 40 carbonos y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HTPs), estos últimos comprenden a los hidrocarburos alifáticos como los alcanos, alquenos, alquinos y los aromáticos, todos estos compuestos tienen una estructura estable químicamente por lo que son considerados como recalcitrantes y contaminantes primarios (Hoang *et al.*, 2021).

Bacterias

En la actualidad se ha destacado el uso de microorganismos con capacidad degradadora para poder disminuir la contaminación por hidrocarburos (Sales da Silva *et al.*, 2020). Ejemplo de estos microorganismos son las bacterias capaces de utilizar el contaminante como fuente de energía convirtiéndolo en sustancias inocuas, lo que les permite remediar sitios contaminados (Rentería y Rosero, 2019).

Existen enzimas que les brindan la capacidad de poder sobrevivir en sitios contaminados con hidrocarburos, como las enzimas dependientes del oxígeno denominadas monooxigenasas facilitándoles un medio para emplear el hidrocarburo como sustrato (Das y Chandran, 2011).

Es importante destacar el uso de las bacterias nativas o autóctonas, estas son de gran interés en la degradación de contaminantes, para poder caracterizarlas y conocer mejor el mecanismo de degradación se pueden aislar directo del entorno afectado (Das y Chandran, 2011) Figura 1. Dichos microorganismos pueden degradar el contaminante mediante la remediación natural o convirtiéndolos en sustancias menos tóxicas o inocuas para el ambiente, estas bacterias primero degradan los compuestos más sencillos de cadenas lineales y cortas, posteriormente los más complejos como los aromáticos los ramificados o bien con más de 20 carbonos (Viramontes *et al.*, 2020).



Figura 1. Bacterias Nativas (*Pseudomonas aeruginosa* AT18) de sitios afectados por derrames de petrolero. Inciso a) imagen propia Inciso b) imagen tomada del artículo (Pérez *et al.*, 2008).

En la Tabla 1 se muestran ejemplos de bacterias eficaces empleadas en la biorremediación, otros géneros de estos microorganismos son: *Achromobacter*, *Marinobacter*, *Actinobacter*, *Mycobacterium*, *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Rhodococcus*, *Corynebacterium*, *Micrococcus*, *Flavobacter*, *Nocardia*, *Bravibacterium*, *Streptococc*, *Stenotrophomonas*, *Methylobacterium* y *Enterobacter*, las cuales se caracterizan por llevar a cabo la síntesis de enzimas con actividad hidrolasa, oxigenasa, desmetilasa, dehalogenasa, transferasa y oxidorreductasa capaces de catalizar la degradación de los hidrocarburos en condiciones aeróbicas y anaeróbicas (Wang *et al.*, 2018).

Tabla 1. Bacterias aisladas de sitios acuáticos con capacidad hidrolítica de hidrocarburos.

Bacterias que degradan petróleo	Especificidad de hidrocarburos	Referencias
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> N6P6	Fenantreno y pireno	Mangwani, <i>et al.</i> (2015)
<i>Halomonas</i> sp. strain MCTG39a	Hexadecano	Gutiérrez <i>et al.</i> (2015)
<i>Cycloclasticus</i> sp. strain BG-2	Fenantreno	Gutiérrez <i>et al.</i> (2015)
<i>Cycloclasticus</i> sp. 78-ME	Hidrocarburos aromáticos policíclicos	Mesina <i>et al.</i> (2016)
<i>Pseudomonas pseudoalcaligenes</i> NP103	Fenantreno y pireno	Mangwani <i>et al.</i> (2016)
<i>Cupriavidus metallidurans</i> CH34	Tolueno	Tófalos <i>et al.</i> (2018)
<i>Marinobacter hydrocarbonoclasticus</i> SdK644	Petróleo crudo	Zenati <i>et al.</i> (2018)
<i>Pseudomonas</i> sp. sp48	Fenol, naftaleno y pentadecano	Farag <i>et al.</i> (2018)
<i>Alcaligenes aquatilis</i> BU33N	Petróleo crudo y fenantreno	Mahjoubi <i>et al.</i> (2019)
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> GOM1	Hexadecano	Muriel-Millán <i>et al.</i> (2019)
<i>Ralstonia pickettii</i>	Petróleo crudo	Purnomo <i>et al.</i> (2019)
<i>Alcanivorax</i> sp. 24	Alcanos	Zadjelovic <i>et al.</i> (2020)
<i>Halomonas pacifica</i> strain Cnaph3	Naftalina	Cheffi <i>et al.</i> (2020)
<i>Oleispira antarctica</i> RB-8	Alcanos alifáticos	Gregson <i>et al.</i> (2020)
<i>Halomonas</i> sp. SZN1	Pireno, indenopireno, criseno	Dell'Anno <i>et al.</i> (2020)
<i>Paracoccus</i> sp. MJ9,	Diesel	Xu <i>et al.</i> (2020)
<i>Alcanivorax</i> sp. IO_7	Alcano	Sinha <i>et al.</i> (2021)
<i>Staphylococcus</i> sp. CO100	Hidrocarburos alifáticos	Hentai <i>et al.</i> (2021)
<i>Pseudomonas aeruginosa halotolerante</i> (AHV-KH10)	Diesel	Pourfadakari <i>et al.</i> (2021)

Dentro de los mecanismos de biodegradación las bacterias pueden llevar a cabo la hidroxilación de los anillos aromáticos del benceno, tolueno, xileno y naftaleno. Además, oxidan las cadenas laterales de alquilo ya que emplean enzimas oxigenasas como las monooxigenasas y las dioxigenasas para poder llevar a cabo la biodegradación aeróbica. Mientras que la degradación anaeróbica es catalizada por bacterias que emplean aceptores terminales de electrones como sulfato, nitrato, manganeso, hierro y CO₂ (Kebede *et al.*, 2022).

Sin embargo para que la degradación se lleve a cabo de una manera más completa se deben de tomar en cuenta ciertos factores como las características genéticas de las bacterias que se van a emplear, el tamaño, la interacción microbiana (si se emplea cepa única o consorcios), la diversidad microbiana, la sinergia o antagonismo (competencia microbiana), las características del contaminante por ejemplo su estructura química, la concentración, biodisponibilidad así como el grado de toxicidad, además de los factores del sitio afectado como la temperatura y pH (Kebede *et al.*, 2021). Uno ejemplo de lo antes mencionado es que a temperaturas bajas, la viscosidad del aceite aumenta, por otro lado en los hidrocarburos de bajo peso molecular se reduce lo que da como consecuencia que el proceso de degradación se retrase; por ello es importante considerar estos factores esto con la finalidad de determinar cuáles son las bacterias remediadoras adecuadas que se podrían emplear en la degradación de los contaminantes (Atlas, 1975).

Mecanismos de degradación de los hidrocarburos

Uno de los mecanismos que emplean las bacterias en la biorremediación es la producción de surfactantes, estos son moléculas que facilitan la degradación del contaminante; debido a que estas moléculas son producidas por organismos vivos se les denomina biosurfactantes; también son llamados tensoactivos, estos modifican las condiciones de la superficie entre dos sustancias como el agua y los hidrocarburos impidiendo que se mezclen y formen una solución homogénea (Viramontes, 2010). El agua y el hidrocarburo no se pueden mezclar debido a que poseen distinto grado de polaridad, ya que la molécula del agua posee átomos de hidrogeno (regiones cargadas positivamente), los cuales son atraídos por el átomo de oxígeno (región cargada negativa) de otras moléculas de agua, en cambio los hidrocarburos poseen moléculas no polares puesto que tienen de manera simétrica cadenas de carbonos e hidrógenos, por ello es que se repelen ya que prefieren unirse con moléculas semejantes a ellas (De la Rosa *et al.*, 2014).

Los biosurfactantes cuentan con grupos hidrofílicos (grupos polares) e hidrofóbicos (grupos no polares) por lo cual poseen afinidad por las moléculas polares y no polares (León *et al.*, 2016). Estos simplemente dirigen el extremo polar hacia las moléculas de agua y hacia el hidrocarburo el extremo no polar, al reducirse la tensión superficial también disminuye las fuerzas de repulsión entre las diferentes fases lo cual permite en este caso que el agua y el hidrocarburo interaccionen y se mezclen. Un ejemplo es el agua la cual tiene una tensión de 72 dinas/cm, que al agregarle un biosurfactante dicho valor puede reducirse hasta 25 dinas/cm (Viramontes, 2020).

Es importante destacar que la tensión superficial puede variar en función de la concentración del biosurfactante, ya que a mayor concentración menos tensión y así el surfactante forma moléculas con una cabeza polar al exterior y una cola no polar al interior pegadas a una partícula en un medio no soluble llamadas micelas formadas por 50 a 100 monómeros de biosurfactante; esto sucede cuando se llena de moléculas de biosurfactante la interfaz, posteriormente unen las colas hidrofóbicas entre si y dejando expuestas las cabezas hidrofílicas a esto se le conoce como Concentración Crítica de Micelas (CMC) en este proceso se centra la capacidad de que el biosurfactante pueda reducir la tensión superficial (Raiger y Lopez, 2009).

Los biosurfactantes dividen la interfaz aire-agua para aumentar el contacto de la cabeza hidrofílica con el agua y así poder disminuir el de la cola hidrofóbica; esto se lleva a cabo en concentraciones bajas de CMC. Por el contrario, en concentraciones altas los biosurfactantes comienzan a formar micelas y toda la superficie está saturada formando compuestos hidrofóbicos dentro de estas lo que genera las microemulsiones

(León *et al.*, 2016). Cuando una fase líquida se distribuye en forma de gotas microscópicas en otra fase continua líquida se le conoce como emulsión. Derivado del crecimiento de las bacterias en la interfaz agua-aceite, la emulsificación también aumenta el área superficial de las gotas, de esta manera estas tienen contacto directo con las gotas del aceite que encapsula el biosurfactante por lo antes mencionado se ha suscitado que estos microorganismos poseen la capacidad de utilizar el hidrocarburo del centro micelar por unión con la membrana celular (Viramontes *et al.*, 2020).

Las bacterias en condiciones anaeróbicas realizan la degradación más agilizada y completa de los contaminantes orgánicos, el proceso oxidativo, la activación además de la incorporación de oxígeno da lugar a una reacción enzimática que es de vital importancia la cual es catalizada por algunas enzimas como es el caso de las oxigenasas y peroxidasas, por otro lado las vías de degradación transforman a los contaminantes en intercesores del metabolismo intermediario central, un claro ejemplo es el ciclo del ácido tricarboxílico. El acetil-CoA, succinato y piruvato, son metabolitos iniciadores centrales que producen la biosíntesis de la biomasa celular, así como mediante la gluconeogénesis se sintetizan azúcares indispensables para diferentes biosíntesis (Fritsche *et al.*, 2000; Hommel, 1990).

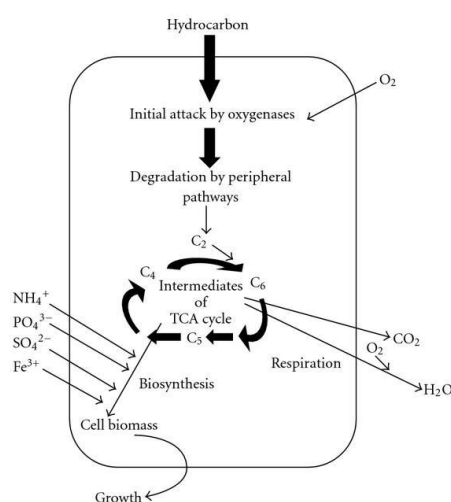


Figura 2. Principio fundamental de la degradación anaeróbica de hidrocarburos por microorganismos. (Imagen tomada del artículo Das *et al.*, 2011).

Conclusión

En esta revisión se da a conocer la importancia de las bacterias nativas que se encuentran presentes en los sitios contaminados con algún hidrocarburo, debido a que estos microorganismos cuentan con el potencial de producir biosurfactantes, estas moléculas que son útiles para degradar el contaminante y poder producir sustancias menos tóxicas o inocuas como el CO_2 y agua. Como se mencionó existen múltiples estudios que demuestran la eficacia de las bacterias para degradar contaminantes

como los hidrocarburos, como: *Pseudomonas*, *Actinobacter*, *Mycobacterium*, *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Rhodococcus*, *Bravibacterium*, *Streptococc*, *Stenotrophomonas*, *Methylobacterium* y *Enterobacter* por mencionar algunas. Por lo que se considera que dichos microorganismos son una gran opción para poder implementarse en la técnica de biorremediación de ecosistemas acuáticos ayudando así a mitigar una serie de efectos que se generan al ocurrir accidentes como los derrames de hidrocarburos.

Referencias

- Atlas, R. M. (1975). Efectos de la temperatura y la composición del petróleo crudo en la biodegradación del petróleo. *Journal of Applied Microbiology*. 30(3) ,396–403.
- Behera, B.K., Das, A., Sarkar, D.J., Weerathunge, P., Parida, P.K., Das, B.K., Thavamani, P., Ramanathan, R. & Bansal, V. (2018). Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in inland aquatic ecosystems: perils and remedies through biosensors and bioremediation. *Environ. Pollut.* 241, 212-233.
- Behera, B.K., Das, A., Sarkar, D.J., Weerathunge, P., Parida, P.K., Das, B.K.,
- Cheffi, M., Hentai, D., Chebi, A., Mhiri, N., Sayadi, S., Marqués, AM & Chamkha, M. (2020). Aislamiento y caracterización de una cepa Cnaph3 de Halomonas pacifica que se degrada recientemente con naftaleno: estudios de biodegradación y producción de biosurfactantes. *Biotech.* 3, 10-89.C
- Cheffi, M., Hentai, D., Chebi, A., Mhiri, N., Sayadi, S., Marqués, AM & Chamkha, M. (2020). Aislamiento y caracterización de una cepa Cnaph3 de Halomonas pacifica que se degrada recientemente con naftaleno: estudios de biodegradación y producción de biosurfactantes. *Biotech.* 3, 10-89.
- Das, N. & Chandran, P. (2011). Microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants: an overview. *Biotechnology Research International*. 1, 1-13.
- De la Huz, R., Lastra, M. & López, J. (2011). Other Environmental Health Issues: Oil Spill. In *Encyclopedia of Environmental Health*; Nriagu, J.O., Ed.; Elsevier Burlington NJ USA. 251-255.
- De la Rosa, N., E. Sánchez y M. Ortiz. (2014). "Biosurfactantes y su papel en la biorremediación de suelos contaminados con plaguicidas", *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal*. 4(1), 47-67.
- Dell'Anno, F., Brunet, C., van Zyl, L. J., Trindade, M., Golyshin, P. N., Dell'anno, A., Ianora, A. & Sansone, C. (2020). Degradación de hidrocarburos y reducción de metales pesados por bacterias marinas en sedimentos altamente contaminados. *Microorganismos*. 8, 1402.

- Farag, S., Solimán, NA. & Abdel-Fattah, Y. R. (2018). Optimización estadística de la biodegradación del petróleo crudo por una bacteria marina local aislada *Pseudomonas* sp. *J. Genet. Ing. Biotecnología*. 16, 409-420.
- Fritsche, W & Hofrichter, M. 2000. Aerobic degradation by microorganisms. In *Environmental Processes- Soil Decontamination*, J. Klein. 146-155.
- Gregson, B. H., Metodíeva, G., Metodiev, M. V., Golyshin, P. N. & McKew, B. A. (2020). Expresión de proteínas en el psicrófilo degradante de hidrocarburos obligado *Oleispira antarctica* RB-8 durante la degradación de alcanos y la tolerancia al frío. *Reinar. Microbiol.* 22, 1870-1883.
- Gutiérrez, T., Biddle, J. F., Teske, A. & Aitken, M. D. (2015). Caracterización dependiente e independiente del cultivo de bacterias degradadoras de hidrocarburos en sedimentos de la cuenca de Guaymas. *Frente. Microbiol.* 6, 695.
- Gutiérrez, T., Whitman, W. B., Huntemann, M., Copeland, A., Chen, A., Kyrpides, N., Markowitz, V., Pillay, M., Ivanova, N. & Mijailova, N. (2015). Secuencia del genoma de *Halomonas* sp. Cepa MCTG39a, una bacteria productora de sustancias exopoliméricas y degradadoras de hidrocarburos. *Anuncio del genoma*. 3, 79-315.
- Hentai, D., Cheffi, M., Hadrich, F., Makhoulfi, N., Rabanal, F., Manresa, A., Sayadi, S. & Chamkha, M. (2021). Investigación de *Staphylococcus* sp marino halotolerante. CO100, como una bacteria prometedor degradadora de hidrocarburos y productora de biosurfactantes, en condiciones salinas. *J. Medio Ambiente. Administrar.* 277, 111-480.
- Hoang, S. A., Sarkar, B., Seshadri, B., Lamb, D., Wijesekara, H., Vithanage, M., Liyanage, C.H., Kolivabandara, P. A., Rinklebe, J., Shiung, S. L., Vinu, A., Wang, H., Kirkham, M. B. & Bolan, N. S. (2021). Mitigation of petroleum-hydrocarbon contaminated hazardous soils using organic amendments: A review. *Journal of Hazardous Materials*. 1, 1-17.
- Hoang, S. A., Lamb, D., Seshadri, B., Sarkar, B., Choppala, G., Kirkham, M. & Bolan, N. S. (2020). Rhizoremediation as a green technology for the remediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils. *J. Hazard. Mater.* 123-282.
- Hommel, R. K. 1990. Formación y función filogenética de los biosurfactantes", *Journal of Applied Microbiology*. 89 (1) 119-158.
- Kebede, B. G., Abera, G. S., Mekonen, E., Tafese, F. T., Abdi, W. A., Aba, E. M., Tafesse M. & Assefa F. (2022). Isolation and Characterization of Diesel-Degrading Bacteria from Hydrocarbon-Contaminated Sites, Flower Farms, and Soda Lakes. *Hindawi*. 1, 1-12.

- Kebede, G., Tafese, T., Abda, E. M., Kamaraj, M. & Assefa, F. (2021). Factors influencing the bacterial bioremediation of hydrocarbon contaminants in the soil: mechanisms and impacts. *Journal of Chemistry*. Article ID 9823362, 17.
- León, M., Contreras, A. y Ramos, J. (2016). "Biosurfactantes en la industria petrolera", *Semilleros*, 2(1): 48-59.
- Mahjoubi, M., Aliyu, H., Capello, S., Naifer, M., Souissi, Y., Cowan, D. A. & Cherif, A. (2019). El genoma de la cepa BU33N de *Alcaligenes aquatilis*: conocimientos sobre la capacidad de degradación de hidrocarburos. *PLoS ONE*. 14, 9 e0221574.
- Mangwani, N., Kumari, S. & Das, S. (2015). Participación de los genes de detección de quórum en el desarrollo de biopelículas y la degradación de hidrocarburos aromáticos policíclicos por una bacteria marina *Pseudomonas aeruginosa* N6P6. *Aplicación Microbiol. Biotecnología*. 99, 10283-10297.
- Mangwani, N., Kumari, S. & Das, S. (2016). Efecto de las lactonas de N-acilhomoserina sintéticas sobre las interacciones célula-célula en *Pseudomonas* marinas y la degradación mediada por biopelículas de hidrocarburos aromáticos policíclicos. *Química Ing. J.* 302, 172-186.
- Marris, C. R., Kompella, S. N. & Miller, M. R. (2020). Polyaromatic hydrocarbons in pollution: a heart-breaking matter. *J. Physiol.* 598, (2), 227-247.
- Mesina, E., Denaro, R., Crisafí, F., Smedile, F., Capello, S., Genovés, M., Genovés, L., Juliano, L., Ruso, D. & Ferrer, M. (2016) Secuencia del genoma de la bacteria degradadora de hidrocarburos aromáticos policíclicos marinos obligados *Cycloclasticus* sp. 78-ME, aislado de depósitos de petróleo del petrolero hundido Amoco Milford Haven, Mar Mediterráneo. *Mar. Genom.* 25, 11-13.
- Miri, S., Naghdi, M., Rouissi, T., Kaur, B. S. & Martel, R. (2018). Recent biotechnological advances in petroleum hydrocarbons degradation under cold climate conditions: A review. *56*, 553-586.
- Mirjani, M., Soleimani, M. & Salari, V. (2021). Toxicity assessment of total petroleum hydrocarbons in aquatic environments using the bioluminescent bacterium *Aliivibrio fischeri*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 207, 111-554.
- Muriel-Millán, L. F., Rodríguez-Mejía, J. L., Godoy-Lozano, E. E., Rivera-Gómez, N., Gutiérrez-Ríos, R. M., Morales-Guzmán, D., Trejo-Hernández, M. R., Estradas-Romero, A. & Pardo-López, L. (2019). La caracterización funcional y genómica de una cepa de *Pseudomonas aeruginosa* aislada del suroeste del Golfo de México revela una adaptación mejorada para la degradación de alcanos de cadena larga. *Frente. Ciencia de marzo*. 6, 572.
- Orish, E. O. (2021). Crude oil and public health issues in Niger Delta, Nigeria: Much ado about the inevitable. *Environmental Research*. 194, 0013-9351.

- Pérez, M. Y., Lopez, M. S., Rodríguez, L. A. R. & Ramos, A. S. A. (2019). Evaluación de impacto socioambiental, por derrame de petróleo de un ducto en Comalcalco, Tabasco. *Journal of Basic Sciences* 2019. 5, 134-152.
- Pérez Silva, RM, Camacho Pozo, MI, Gómez Montes de Oca, JM, Ábalos Rodríguez, A., Viñas, M., & Cantero Moreno, D. (2008). Aislamiento y selección de una cepa bacteriana degradadora de hidrocarburos a partir de suelos contaminados con petróleo. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 39 (1), 44-51.
- Pourfadakari, S., Ghafari, S., Takdastán, A. & Jorfi, S. (2021). Un biosurfactante resistente a la sal producido por *Pseudomonas aeruginosa* moderadamente halotolerante (AHV-KH10) y su aplicación para la biorremediación de sedimentos contaminados con diesel en ambiente salino. *Biodegradación*, 32, 327-341.
- Purnomo, A. S., Rizqi, H. D., Harmelia, L., Anggraeni, S. D., Melati, R. E., Damayanti, Z. H., Shafwah, O. M. & Kusuma, F. C. (2019). Biodegradación de petróleo crudo por *Ralstonia pickettii* en medio de alta salinidad. *Malayos. J.Fundam. aplicación ciencia*. 15, 377-380.
- Raiger, L. y López, N. (2009). "Los biosurfactantes y la industria petrolera", *Química Viva*, 3(8), 146-161.
- Rentería M & Rosero D. (2019). Estudios sobre la biorremediación en Colombia. *Hechos Microbiol*. 10, 39-48.
- Sales da Silva I., Gomes de Almeida F. C, Padilha da Rocha e Silva N. & Casazza A. (2020). Soil bioremediation: overview of technologies and trends. *Energies*. 13, 1-25.
- Sinha, R., Krishnan, K. & Kurian, P. (2021). Secuencia completa del genoma y análisis comparativo del genoma de *Alcanivorax* sp. IO_7, una bacteria degradadora de alcanos marinos aislada del agua de mar profunda con influencia hidrotermal de la cordillera suroeste de la India. *Genomics* .113, 884-891.
- Tófalos, A. E., Daghighi, M., González, M., Papacchini, M., Franzetti, A. & Seeger, M. (2018). Degradación del tolueno por *Cupriavidus metallidurans* CH34 en condiciones de reducción de nitrato y en sistemas bioelectroquímicos. *FEMS Microbiol. Letón*. 365(12), 1-8.
- Truskewycz, A., Gundry, T.D., Khudur, L.S., Kolobaric, A., Taha, M., Aburto-Medina, A., Ball, A.S. & Shahsavari, E. (2019). Petroleum Hydrocarbon Contamination in Terrestrial Ecosystems-Fate and Microbial Responses. *Molecules*. 24(18), 3400.
- Varjani, S.J. & Upasani, V.N. (2017). A new look on factors affecting microbial degradation of petroleum hydrocarbon pollutants. *Int. Biodeterior. Biodegrad*. 120, 71-83.

- Viramontes R. S., Portillo R. M. C. & Nevárez M. G. V. (2020). Bacterias que se nutren de hidrocarburos. *Ciencia*. 4, 72- 79.
- Viramontes, S., Portillo R. M. C., Vallinas C, M. L., Torres M. J. V., Rivera C. B. E. & Nevárez M. G. V. (2010). "Selection of biosurfactant/bioemulsifier – producing bacteria from hydrocarbon– contaminated soil", *Brazilian Journal of Microbiology*, 41, 668-675.
- Wang, W., Wang, L. & Shaoa, Z. (2018). Vías de degradación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) del degradador marino obligado de PAH *Cycloclasticus* sp. cepa P1. *Aplicación Reinar. Microbiol.* 84, 1–15.
- Wang, Y., Liu, M., Dai, Y., Luo, Y. & Zhang, S. (2021). Health and ecotoxicological risk assessment for human and aquatic organism exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons in the Baiyangdian Lake. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28, 574-586.
- Xu, M., Fu, X., Gao, Y., Duan, L., Xu, C., Sol, W., Li, Y., Meng, X. & Xiao, X. (2020). Caracterización de una bacteria productora de biosurfactantes aislada del medio marino: actividad superficial, caracterización química y biodegradación. *J. Medio Ambiente. Química Ing.* 8, 104-277.
- Zadjelovic, V., Gibson, M. I., Dorador, C. & Christie-Oleza, J. A. (2020). Genoma de *Alcanivorax* sp. 24: Una bacteria degradadora de hidrocarburos aislada de desechos plásticos marinos. *Mar. Genom.* 49, 100-686.
- Zenati, B., Chebi, A., Badis, A., Eddouuaouda, K., Boutoumi, H., El Hattab, M., Hentai, D., Chelbi, M., Sayadi, S. & Chamkha, M. (2018). Un tensioactivo microbiano no tóxico de *Marinobacter hydrochoclasticus* SdK644 para mejorar la solubilización del petróleo crudo. *Ecotoxicol. Reinar. Seguro*, 154, 100-107.