

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

DOI: 10.47864/SE(51)2021p107-118_136

Sociedad Colombiana
de la Ciencia del Suelo**TÉCNICAS DE BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS CON FINES DE USO EN EL MUNICIPIO DE TIBÚ, NORTE DE SANTANDER**Ibonne Geaneth Valenzuela B ¹✉, Laura Galindo ², Diana Mantilla², Daren Stella Moncada ², Eloy Orjuela ², Keila Romano ², Javier Rincón ²

¹ Docente investigador Universidad Francisco de Paula Santander-UFPS, Facultad de Ciencias Agrarias y del Ambiente, Semillero de Investigación Suelo y Ambiente SINSA Cúcuta, Colombia.

✉ ibonnegeanethvb@ufps.edu.co
ORCID 0000-0002-1173-3133.

² Estudiantes del programa de Ingeniería Ambiental y miembros del Semillero de Investigación Suelo y Ambiente- SINSA Universidad Francisco de Paula Santander-UFPS, Cúcuta, Colombia.

Palabras clave: Bioestimulación, Tratamiento, Tecnologías, Eficiencia, Edafoclimáticas.

RESUMEN

El municipio de Tibú, Norte de Santander-Colombia se caracteriza por ser una zona rica en petróleo, donde se han presentado numerosos derrames de crudo a causa de daños en la infraestructura petrolera, específicamente en los oleoductos, lo que ha ocasionado un impacto negativo en los recursos naturales como el suelo. Por consiguiente, el presente artículo tiene como finalidad identificar las principales técnicas de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos y así proponer las más eficientes en el tratamiento de suelos de este municipio, para ello se buscaron las diferentes investigaciones realizadas a nivel nacional e internacional sobre la temática a tratar y se realizó un análisis detallado que permitió establecer cuáles de estas técnicas podrían ser implementadas en el municipio de Tibú de acuerdo a condiciones edafoclimáticas similares. De esta manera, se evidencia que la bioaumentación es la técnica más aplicada, sin embargo, la bioestimulación y la tecnología Oil Spill Eater II son las técnicas con mayor eficiencia en la remoción de hidrocarburos.

BIOREMEDIATION TECHNIQUES FOR HYDROCARBON-CONTAMINATED SOILS FOR USE IN THE MUNICIPALITY OF TIBÚ, NORTE DE SANTANDER

Keywords: Biostimulation, Treatment, Technology, Efficiency, Edaphoclimatic.

ABSTRACT

The municipality of Tibú, Norte de Santander-Colombia is characterized as an oil-rich area, where there have been numerous oil spills due to damage to the oil infrastructure, specifically the pipelines, which has caused a negative impact on natural resources such as soil. Therefore, the purpose of this article is to identify the main bioremediation techniques for hydrocarbon-contaminated soils and propose the most efficient ones for the treatment of soils in this municipality. For this purpose, different national and international research on the subject was sought and a detailed analysis was made to establish which of these techniques could be implemented in the municipality of Tibú according to similar edaphoclimatic conditions. In this way, it is evident that bioaugmentation is the most applied technique, however, biostimulation and Oil Spill Eater II technology are the most efficient techniques in hydrocarbon removal.

Rec : 31/10/2021

Acep : 27/11/2021



INTRODUCCIÓN

El municipio de Tibú se ubica en la parte norte del departamento de Norte de Santander (Colombia) con una superficie de 2.768 km² y una población de 39.997 habitantes. Esta zona se caracteriza por ser un bosque húmedo tropical con una precipitación anual de entre 2.200 y 2.800 mm, una temperatura máxima promedio de 28 a 32 ° C, una humedad relativa del 82% y una altitud que varía de 75 a 120 msnm. (Rangel L. et al. 2014).

El municipio de Tibú tiene gran influencia petrolera en Norte de Santander, ya que en su jurisdicción se encuentran los campos de la antigua concesión Barco, la Refinería de Tibú y se cruza el oleoducto caño Limón-Coveñas. Por otra parte, se han presentado afectaciones en la infraestructura petrolera lo que provoca derrames de crudo y contaminación en los suelos de Tibú.

De acuerdo a la (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2019) la contaminación del suelo es generada principalmente por actividades antropogénicas que alteran sus propiedades fisicoquímicas y biológicas lo que dificulta la capacidad del suelo para recuperarse. Asimismo, según la (FAO, 2021) el suelo se define como un recurso natural no renovable sumamente importante que realiza funciones esenciales en el desarrollo de la vida terrestre, en la regulación y evolución de todos los demás recursos ya que forma parte de la mayoría de ciclos biogeoquímicos.

La degradación de suelo es ocasionada, entre otras actividades, por la contaminación que se genera a través de los derrames de hidrocarburos, esto debido

a la explotación desmedida del petróleo crudo que puede afectar las fuentes hídricas próximas al suelo o el suelo mismo provocando enormes impactos negativos que se hacen más evidentes cuando la contaminación llega directamente a zonas empleadas para la agricultura ya que afecta directamente la salud y bienestar de la comunidad.

Los hidrocarburos que se derivan del petróleo son altamente utilizados en distintos procesos de refinación, de los cuales se obtiene gran parte de la materia prima utilizada en las grandes industrias mundiales, en ese sentido, existe una enorme cantidad de estos y con ello se han evidenciado enormes desastres naturales que se han generado a lo largo de los años, debido al alto grado de toxicidad que tienen estos compuestos y al impacto que generan sobre los ecosistemas. Debido a la frecuente ocurrencia de estos escenarios en los que el suelo es el principal afectado por la contaminación de hidrocarburos, se hace necesario una mayor participación de las autoridades ambientales y de investigación en la zona de Tibú ya que en esta área las técnicas de biorremediación aplicadas para el tratamiento de suelos contaminados por hidrocarburos son limitadas y se reducen a la implementación de técnicas como landfarming que resultan económicamente costosas y de difícil ejecución en este municipio.

A raíz de los avances en el área biotecnológica y ambiental se han desarrollado diferentes técnicas y tecnologías enfocados a la remediación y protección del suelo mediante agentes biológicos (Seres vivos o sus derivados), incorporación de nutrientes al suelo, uso de compuestos químicos, entre otros; esto

ha supuesto un enorme avance en la descontaminación y conservación de suelos, no obstante existen ciertas limitaciones a la hora de aplicar estas tecnologías como lo son los costos de implementación e investigación o la carencia de conocimiento sobre cómo aplicarlas y de las enormes ventajas de implementar estas herramientas biotecnológicas, de tal manera conocer las variables y procesos estudiados permitirá determinar las principales técnicas de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos haciendo énfasis en petróleo crudo mediante la comparación y análisis de diferentes investigaciones a nivel nacional e internacional, con el fin de proponer las metodologías y técnicas con mayor eficiencia en la descontaminación de suelos en el municipio de Tibú, Norte de Santander-Colombia.

METODOLOGÍA

Inicialmente se efectuó una búsqueda exhaustiva de investigaciones realizadas a nivel nacional e internacional, donde se trabajaron técnicas de biorremediación en suelos contaminados con hidrocarburos con énfasis en petróleo crudo que fueron publicadas en los últimos años, para ello se hizo uso de diferentes bases de datos electrónicas como: SciElo, Redalyc, ScienceDirect, Springer, Scopus y PubMed; en las cuales se establecieron algunas palabras claves y combinaciones de las mismas para lograr obtener, durante la búsqueda, un mayor número de publicaciones relacionadas con el tema. Posteriormente se elaboraron criterios de inclusión que permitieron seleccionar y analizar los estudios de biorremediación en suelos contaminados. Los criterios de inclusión fueron: palabras claves (biorremediación, petróleo, tratamiento, suelo), tipo de estudio (artículos, tesis de pregrado y tesis de posgrado), aplicaciones

(fitorremediación, biorremediación in situ, biorremediación ex situ, bioestimulación, degradación microbiana) y fecha de publicación (entre los años 2011 y 2021) En base a dichos criterios, se realizó la exclusión de las investigaciones que no cumplieran con lo deseado en el análisis, por ejemplo: estudios publicados con anterioridad a los últimos diez años o estudios con métodos poco eficientes en la remoción de petróleo.

Una vez finalizadas las búsquedas bibliográficas, el material encontrado se recopiló en un archivo de Excel con el fin de conocer la información relevante que facilitó estudiar detenidamente los parámetros aplicados en cada técnica. En la primera etapa trabajada se establecieron las técnicas planteadas en las investigaciones y el porcentaje de aplicación que presentaron dentro del estudio realizado, para ello se hizo uso de una gráfica circular que permite mayor comprensión de la información establecida. Seguidamente se planteó la información recopilada mediante una síntesis que integra: las técnicas investigadas, el método aplicado en cada técnica, las condiciones edafoclimáticas en las que se trabajó y el porcentaje de eficiencia que obtuvo cada método.

La ejecución de las etapas anteriores permitió proponer las técnicas que presentan mayor probabilidad para ser aplicadas en la remoción de derrames de petróleo en los suelos de Tibú teniendo en cuenta las metodologías que presentaron un mayor porcentaje de eficiencia y la relación existente entre las condiciones ambientales de este municipio y los suelos en donde se realizó el estudio de dichas técnicas. Finalmente, y en base a lo propuesto en cada etapa de la investigación sobre las técnicas de biorremediación en suelos contaminados

por hidrocarburos, se generaron los resultados obtenidos y las discusiones que surgieron a lo largo de la revisión de otras investigaciones.

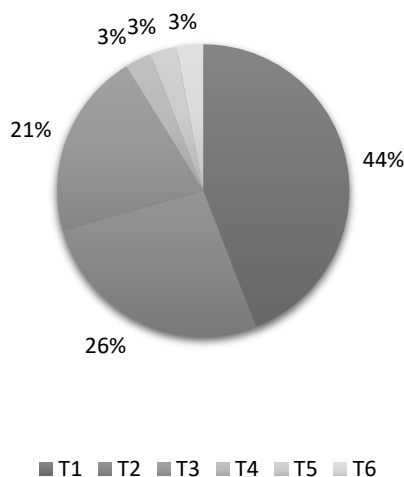
RESULTADOS Y DISCUSIONES

TÉCNICAS DE BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS

A partir del análisis de treinta y cuatro artículos científicos nacionales e internacionales se determinaron las técnicas de mayor implementación en los suelos contaminados por hidrocarburos, de

esta manera los principales procesos empleados fueron la bioestimulación y bioaumentación, los cuales consisten en la utilización de microorganismos y/o nutrientes los cuales se desarrollan de manera óptima en un medio cálido, contribuyendo en la recuperación de los suelos afectados por contaminantes sin alterar el equilibrio del ecosistema, estas técnicas se pueden implementar de manera individual o combinada.

En la figura 1 se evidencia el porcentaje de aplicabilidad de las técnicas de biorremediación utilizadas en la información bibliográfica examinada.



T1: bioaumentación; T2: bioestimulación; T3: bioaumentación + bioestimulación; T4: bioaumentación + bioestimulación, bioaumentación, bioestimulación, atenuación natural y factores abióticos; T5: tecnologías de biorremediación fisicoquímicas + bioaumentación; T6: tecnología Oil Spill Eater II

Figura 1. Técnicas más utilizadas de Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos

FUENTE: autores.

Partiendo de la figura anterior se determinó que las técnicas más aplicadas dentro de los estudios revisados en el presente artículo fueron la bioaumentación y bioestimulación con un uso del 44% y 22% respectivamente, dado que pueden desarrollarse de una manera más idónea y eficiente a temperaturas altas, lo cual concuerda con el estudio de (Margesin y Schinner, 1997) y (Ruberto,

et al. 2010) demostrando que estas técnicas tienen poca eficacia a temperaturas bajas.

La figura 1 también permite observar técnicas con un bajo porcentaje de uso, sin embargo, esto no indica que sean métodos menos eficientes, ya que su poco uso se debe al requerimiento de ciertas características que van desde las condiciones

edaofoclimáticas, las concentraciones del contaminante hasta los costos del tratamiento que limitan la implementación de las mismas.

TÉCNICAS Y MÉTODOS DE BIORREMEDIACIÓN DE HIDROCARBUROS MÁS EFICIENTES

Bajo la comparación de los artículos científicos investigados se estableció cuáles son las técnicas y los métodos que presentan mayor porcentaje de eficiencia para su implementación en el municipio de Tibú teniendo en cuenta las condiciones ambientales similares.

En la tabla 1 se observa el porcentaje de remoción de las diferentes técnicas de biorremediación utilizadas después de la aplicación del tratamiento.

Tabla 1. Técnicas de Biorremediación más eficientes teniendo en cuenta las condiciones ambientales similares

Técnica	Método	Condiciones de aplicación	% Eficiencia	Fuente
Bioestimulación	Extracto de cáscaras de naranja dulce (<i>Citrus sinensis</i>) y uso de plántulas de maíz (<i>Zea mays</i>) como bioindicador	Suelo: Molisol, textura franco arenosa arcillosa pH de 5,5 Clima: Temp máx. prom de 33°C en marzo y de 30°C en enero.	84,2% para la disolución al 1%; 86,9% para la disolución al 3% y 90,5% para la disolución al 5%	(Velásquez, 2016)
	Lodos de depuradora y estiércol de vaca como componentes orgánicos	Clima : Temp máx. entre 30 °C y 33 °C y Temp min sobre los 23 °C.	Con el estiércol de vaca se obtuvo un 94% de remoción y con lodos de aguas residuales 82%	(Agamuthu et al. 2013)
	Implementación de lodos residuales	Suelo:pH 8.46 ± 0.14, Franco arenoso, 1.65 ± 0.17% de humedad Clima: La temperatura varía entre los 1°C a 31°C	93 ± 3.25% de remoción.	(Martínez et al. 2011)
	Aplicación de agentes surfactantes y estimulantes Fósforo y carbono en un suelo contaminado combinado con suelo de uso agrícola	Suelo: pH ácido Clima: 21°C a 31°C Suelo: Semidesértico, francoarcilloarenoso, pH 8.3 y conductividad eléctrica de 1 mS. Clima: entre 11°C a 36°C	Eficiencia: 52% de remoción de los HTP 92,7% de remoción de los TPH	(Trejos, 2017) (Rivera et al. 2018)
Bioaumentación	Incorporación de tres cepas de <i>Trichoderma</i> spp. <i>Trichoderma harzianum</i> , <i>Trichoderma viride</i> y <i>Trichoderma psedokoningii</i>	Suelo: Franco arenoso, pH 6.8 Clima: Temp. media 23°C	Remoción entre 47 y 69.1% en los hidrocarburos	(Pesántez; Castro, 2016)
	<i>Pseudomonas</i> spp productoras de surfactantes	Suelo: tierra de tablazos desérticos y densos bosques de algarrobo Clima: varía de 17 °C a 31 °C	Rendimiento de 35% (<i>Pseudomonas</i> sp. 2HI), 31% (<i>Pseudomonas</i> sp.8JU) y 19% (<i>Pseudomonas</i> sp. 4CF).	(Vasilyeva et al. 2020)

	Consortio de bacterias de los géneros <i>Bacillus</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp., <i>Serratia</i> sp., <i>Raoultella</i> sp. y <i>Enterobacter</i> sp Incorporación de tres especies de hongos <i>Aspergillus Niger</i>, <i>Thichoderma Harzianum</i> y <i>Paecilomyces Lilacinus</i> Colonias microbiológicas presentes en el estiércol de gallinas blancas de la cepa leghorn	Suelo: Francoarenoso Clima: 22°C a 31°C Franco arenoso; estructura: suelta; poros: 44,2%; seco: suelto; húmedo: suelto; pH: 5,3; Clima: 25.6°C altitud de 240 a 320 m.s.n.m Suelos finos de consistencia media a dura clima: Temp prom de 18 °C	El conjunto de todas las cepas redujo el 33% de TPH Se obtuvo para <i>Aspergillus niger</i> 37,65%, para <i>Thichoderma harzianum</i> 32,76 % y para <i>Paecilomyces lilacinus</i> 29,59 %. Remoción del 91,1 %	(Reyes et al. 2018) (Loayza, 2017) (Muñoz, 2017)
	Distintas dosis de humus de lombriz	Suelo de textura: franco arcillosa; densidad: 1,28; porosidad: 51%; pH: 5,17 y Clima: Temp máx. 32°C y altura de 150m	T1 disminuyó un 69,59%, en el T2 un 84,33%, en el T3 86,74% y en el T4 75,52% respectivamente.	(Rodríguez, 2018)
Bioestimulación + Bioaumentación	Formación de consorcios bacterianos y agregado de nitrógeno y el fósforo al suelo como nutrientes Cuatro cepas mixtas de complejos bacterianos en conjunto de salvado en forma de SCBA Uso de bacterias como <i>Sphingobium</i> sp, <i>Bosea</i> sp, <i>Pseudomonas</i> sp, <i>Rhodococcus</i> sp, <i>Phenylobacterium</i> sp, glucosa, nitrato de amonio, o ambos	Clima: desértico subtropical árido con una temp máx. de 32°C y una temp min de 18°C. La temp prom anual de 21°C. Clima: La temperatura generalmente varía de 7 °C a 33 °C S1(La venta): franco-arenoso, pH 5,45, Cima: de 20 a 34°C	75% de eficiencia de biorremediación Se removieron el 96,6% de TPH, el 98% de hidrocarburos saturados y el 96,8% de hidrocarburos aromáticos 87% de remoción	(García, 2016) (Ke et al. 2021) (Rodríguez et al. 2021)
Bioaumentación + Bioestimulación, bioaumentación, bioestimulación, atenuación natural y factores abióticos	Pseudomonas aeruginosa y evaluación de la fitotoxicidad sobre la germinación de la semilla de <i>Vigna radiata</i>	Suelo: textura franco arenosa. pH 7,18; 0,79% de Carbono, 0,022% de N, 21,33 (mg / kg) de P y 192,67 (mg / kg) de K	Disminución del 92,97 ± 0,92% , 80,95% de germinación en cinco días en suelo tratado	(Varjani et al. 2020)

Oil Spill Eater II	Implementación de la tecnología Oil Spill Eater II en 3 muestras de suelo contaminadas	Suelo: Clima: 22 a 27 °C	Remoción del 99,47%, 98.58% y 99.4% de TPH en las muestras A, B y C respectivamente	(Casallas et al. 2020)
--------------------	--	-----------------------------	---	------------------------

FUENTE: Autores.

La bioestimulación es un proceso para mejorar la remediación microbiana mediante el suministro de nutrientes inorgánicos adicionales, aireación y humedad, manteniendo el pH y la temperatura en suelos contaminados; esta técnica como lo muestra la tabla 1 ha sido la más relevante al ser comúnmente aplicada bajo diversos métodos que proporcionan un porcentaje elevado de remoción de TPH. Una de las características que favorece la aplicabilidad de la bioestimulación es la temperatura del lugar puesto que al ser zonas con temperaturas cálidas los microorganismos tienen una mayor adaptación y proliferación, tal como lo afirma (Delille et al. 2007) al precisar que varios estudios han informado la ventaja de implementar estrategias de bioestimulación durante las estaciones más cálidas.

Por otra parte, a comparación de la bioestimulación, la bioaumentación es una técnica que presenta dificultades para desarrollarse bajo ciertas condiciones de clima y tipo de suelo; (Ruberto et al.2010) sugiere reemplazar la bioaumentación por bioestimulación. No obstante, estas técnicas pueden ser combinadas con el fin de conseguir una mayor eficiencia en la degradación de los TPH presentes en el suelo contaminado.

A parte de las técnicas mencionadas anteriormente, se han elaborado nuevas alternativas como las diferentes tecnologías que son muy eficientes al

momento de remediar suelos contaminados, aunque algunas requieren una alta inversión económica, otras como el sistema Oil Spill Eater II resultan accesibles y de alta eficiencia con una remoción superior al 98% de TPH.

METODOLOGÍAS Y TÉCNICAS RECOMENDADAS PARA LA APLICACIÓN EN EL MUNICIPIO DE TIBÚ

Aunque actualmente no se dispone información muy detallada sobre los suelos del municipio de Tibú, existe un estudio general sobre los suelos del mismo. A causa de la gran diversidad de suelos presentes en el territorio, se encuentran los Aeríc Fluvaquents los cuales se consideran de textura franco arcillosa a arcillosa, con drenaje pobre y baja fertilidad, por otro lado tenemos la consociación Typic Dystrudepts que se ha derivado de rocas sedimentarias clásticas, se caracteriza por sus numerosos yacimientos de petróleo; los Lithic Udorthents ocupan las áreas de mayor pendiente, se encuentran limitados por roca, son excesivamente drenados, de clase textural franco gravilosa; los Oxic Dytrudepts son profundos, bien drenados, de textura franca a franco arcillosa, bajos contenidos de nutrientes como P, Ca, Mg y K, los Typic Udorthents, están presentes en las áreas de menor pendiente, bien drenados, de textura franco arenosa a arenosa, con contenidos bajos de Ca, Mg, K, P; por último, se encuentran los Typic Eutrudepts son moderadamente

profundos, bien drenados, de textura franco arenosa a arenosa (IGAC, 2006)

Con base a la información analizada sobre las diferentes técnicas y metodologías de biorremediación de hidrocarburos aplicadas a nivel nacional e internacional

se realizó una comparación teniendo en cuenta las condiciones edafoclimáticas del municipio de Tibú y las eficiencias de remoción del contaminante. En la Tabla 2 se presentan dos técnicas y tres métodos seleccionadas que pueden tener un uso potencial en este municipio.

Tabla 2. Técnicas con posible uso en el municipio de Tibú

Técnica	Método
Bioestimulación	Lodos de depuradora y estiércol de vaca como componentes orgánicos
	Extracto de cáscaras de naranja dulce (<i>Citrus sinensis</i>) y uso de plántulas de maíz (<i>Zea mays</i>) como bioindicador
Oil Spill Eater II	Implementación de la tecnología Oil Spill Eater II en 3 muestras de suelo contaminadas

FUENTE: Autores.

La técnica de bioestimulación utilizando componentes orgánicos para mejorar el crecimiento microbiano autóctono degrada directamente los contaminantes, haciendo uso de lodos residuales y estiércol de vaca que obtuvieron porcentajes de remoción del 82% y 94% respectivamente (Tabla 2.), esta técnica fue seleccionada debido a la fácil obtención y el bajo costo del principio activo, el cual no se debe buscar en un sitio externo al considerar lo indicado por (Arias, 2020) donde afirma que el municipio de Tibú cuenta con una planta de tratamiento de agua residual de tipo biológico y a su vez se trata de un municipio ganadero.

La segunda técnica de bioestimulación la cual emplea extracto de cáscara de naranja es una gran opción de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos ya

que en el estudio de (Velásquez, 2016) se refleja el crecimiento de la planta de maíz como indicador de fitotoxicidad. Dado el bajo costo y la fácil obtención del activo aplicado, los porcentajes de remoción del contaminante indicados en la tabla 1 y a la similitud de las condiciones edafoclimáticas del lugar de estudio comparado con Tibú se determina que esta técnica puede llevarse a cabo en este municipio.

La tecnología Oil spill eater II es un método de biorremediación caracterizado por ser un proceso in-situ, es asequible, y ecológicamente sostenible; basado en una enzima biológica que transforma los contaminantes en una fuente natural de alimento para los microorganismos presentes en el ambiente (Casallas y González, 2020). Esta técnica se seleccionó debido a que obtuvo el mayor

porcentaje de remoción entre los artículos investigados, no es tóxico para ningún ser vivo, es aplicado directamente en el área de contaminación evitando un costo adicional de transporte y además fue aplicado en el territorio colombiano bajo condiciones ambientales similares al municipio de Tibú.

CONCLUSIONES

Después de realizar una revisión exhaustiva de artículos científicos nacionales e internacionales referentes a la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos, se determinó que la bioaumentación y bioestimulación fueron las técnicas más empleadas debido al potencial degradativo que presentan algunos microorganismos utilizados en este proceso.

Mediante el análisis y la comparación de las diferentes técnicas y metodologías estudiadas de biorremediación se resaltan la bioestimulación y la tecnología Oil Spill Eater II las cuales demostraron un mayor cumplimiento en los parámetros establecidos con fines de aplicabilidad en el municipio de Tibú, teniendo en cuenta las condiciones edafoclimáticas y su porcentaje de efectividad; cabe destacar que la tecnología Oil Spill Eater II se considera óptima ya que no genera impactos negativos en los ecosistemas donde se implementa, es de bajo costo y presenta un alto porcentaje de remoción de TPH.

REFERENCIAS

Casallas Peña, S. M., & Gonzalez Lopez,

M. C. (2020). Evaluación técnica de la recuperación ambiental del suelo por derrame de petróleo crudo mediante la aplicación de la tecnología oil spill eater II en un pozo de un bloque en el Casanare (Bachelor's thesis, Fundación Universidad de América).

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (2019), El suelo recurso para la vida. <https://www.gob.mx/conanp/articulos/el-suelo-recurso-para-la-vida>

Delille, D., Pelletier, E., & Coulon, F. (2007). The influence of temperature on bacterial assemblages during bioremediation of a diesel fuel contaminated subAntarctic soil. *Cold Regions Science and Technology*, 48(2), 74-83.

FAO. (2021). *FAO*. Obtenido de *FAO*: <https://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2006). Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Norte de Santander. Bogotá.

Ke, C.-Y., Qin, F.-L., Yang, Z.-G., Sha, J., Sun, W.-J., Hui, J.-F., Zhang, Q.-Z., & Zhang, X.-L. (2021). Bioremediation of oily sludge by solid complex bacterial agent with a combined two-step process. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 208(111673), 111673.

Loayza Vargas, M. F. (2017). Eficiencia degradativa de tres especies de hongos benéficos *Aspergillus Niger*, *Thichoderma Harzianum* y *Paecilomyces Lilacinus* sobre

- suelos contaminados con petróleo en la parroquia San Carlos del cantón Joya de los Sachas (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).
- Margesin, R., & Schinner, F. (1997). Bioremediation of diesel-oil-contaminated alpine soils at low temperatures. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 47(4), 462-468.
- Martínez-Prado, A., Pérez-López, M., Pinto-Espinoza, J., Gurrola-Nevárez, B. A., & Osorio-Rodríguez, A. L. (2011). Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 27(3), 241-252.
- P. Agamuthu, Y.S. Tan, S.H. Fauziah (2013), Bioremediation of Hydrocarbon Contaminated Soil Using Selected Organic Wastes, *Procedia Environmental Sciences*, <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.04.094>.
- Pesántez, M., & Castro, R. (2016). Potencial de cepas de *Trichoderma* spp. para la biorremediación de suelos contaminados con petróleo. *Biotechnología Vegetal*, 16(4).
- Rangel L, E., Puentes M, G. A., & Rodríguez C, L. F. (2014). An analysis at the technology level of the oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) plantations in the municipality of Tibu (Colombia). *Agronomía Colombiana*, 32(3), 432-439.
- <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v32n3.45931>
- Reyes-Reyes, M. A., Puentes-Cala, E. A., Casanova-Montes, E. L., López-Deluque, F., Panqueva-Álvarez, J. H., & Castillo-Villamizar, G. A. (2018). Inmovilización de bacterias potencialmente degradadoras de petróleo crudo en matrices orgánicas naturales y sintéticas. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 34(4), 597-609.
- Rivera Ortiz, Patricio, Rivera Lárraga, Jesús Emmanuel, Andrade Limas, Elizabeth del Carmen, Heyer Rodríguez, Lorenzo, De la Garza Requena, Francisco Rafaela, Castro Meza, Blanca Idalia. (2018). Bioestimulación Y Biorremediación De Recortes De Perforación Contaminados Con Hidrocarburos. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 34(2), 249-262. <https://doi.org/10.20937/rica.2018.34.02.06>
- Rodríguez Berna, P. G. (2018). Efecto del humus de lombriz en la remediación de suelos contaminados con crudo de petróleo. Ucayali, Perú.
- Rodríguez-Urbe, M. L., Peña-Cabriales, J. J., Rivera-Cruz, M. del C., & Délano-Frier, J. P. (2021). Native bacteria isolated from weathered petroleum oil-contaminated soils in Tabasco, Mexico, accelerate the degradation petroleum hydrocarbons in saline soil microcosms. *Environmental Technology & Innovation*, 23(101781), 101781.
- Ruberto, L., Vazquez, SC, Dias, RL,

- Hernández, EA, Coria, SH, Levin, G., Balbo, AL, MacCormack, WP, (2010). Estudios a pequeña escala hacia un uso racional de la bioaumentación en un suelo antártico contaminado con hidrocarburos. Antártida.
- Trejos Delgado, M. C. Evaluación de un proceso de biorremediación aplicado a un suelo contaminado con petróleo crudo. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente.
- Varjani, S., Upasani, V. N., & Pandey, A. (2020). Bioremediation of oily sludge polluted soil employing a novel strain of *Pseudomonas aeruginosa* and phytotoxicity of petroleum hydrocarbons for seed germination. *Science of the Total Environment*, 737, 139766.
- Vasilyeva, G., Kondrashina, V., Strijakova, E., & Ortega-Calvo, J. J. (2020). Adsorptive bioremediation of soil highly contaminated with crude oil. *Science of the Total Environment*, 706, 135739.
- Velásquez, T. D. M. (2016). Crecimiento de plantas de maíz (*Zea mays*) en un suelo contaminado con petróleo y remediado con extracto de cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*). *Enfoque UTE*, 7(3), 1-13.