

Remediación de suelos contaminados con hidrocarburos mediante sistemas surfactante aceite agua en Yaracal Estado Falcón, Venezuela

Remediation of soil contaminated with hydrocarbons using oil-water surfactant systems in Yaracal, Estado Falcón, Venezuela

Remediação de solos contaminados por hidrocarbonetos utilizando sistemas surfactante-óleo-água em Yaracal, Estado Falcón, Venezuela

Pérez Víctor M. ¹, Pereira A. Juan C. ¹, Manila Juan P. ², Acosta Eduardo ²

¹ Facultad de Ciencias y Tecnología. Universidad de Carabobo, Naguanagua 2005. Venezuela. ROR: <https://ror.org/05sj7yp62>

² Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo, Naguanagua 2005. Venezuela. ROR: <https://ror.org/05sj7yp62>

✉ vmperetz@uc.edu.ve | ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8048-3652>

✉ juancpereira73@gmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4600-726X>

✉ manila.juan@gmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9342-0421>

✉ eduardoacosta@gmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0584-1983>

E-mail de correspondencia: vmperetz@uc.edu.ve

Revista Saastal

Vol. 1(2) julio - diciembre 2025

Como citar este artículo

Pérez, V., Pereira, J., Manila, J., & Acosta, E., (2025). *Remediación de suelos contaminados con hidrocarburos mediante sistemas surfactante aceite agua en Yaracal Estado Falcón, Venezuela*. *Saastal*, 1(2), e2.

© 2025 Saastal. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0), que permite el uso, distribución y reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite debidamente al autor y la fuente original.

Recibido: 28 de mayo de 2025

Revisado: 25 de junio de 2025

Aceptado: 10 de julio de 2025

Publicado: 25 de julio de 2025

Resumen

La contaminación de suelos por derrames de hidrocarburos durante las fases de explotación, producción y refinación constituye una problemática ambiental crítica que demanda soluciones tecnológicas eficientes y sostenibles. Esta investigación evaluó la capacidad de los sistemas Surfactante-Aceite-Agua (SOW) para la remoción de crudo en suelos impactados, tomando como caso de estudio la zona de Yaracal, Estado Falcón. La metodología consistió en la ejecución de barridos de formulación unidimensional utilizando el surfactante aniónico dodecil sulfato de sodio (SDS), empleando la concentración de cloruro de sodio (NaCl) como variable de formulación principal. El objetivo fue determinar la disposición más efectiva y la formulación óptima para maximizar el desempeño del sistema bajo diversas condiciones de operación, tales como variaciones en el caudal y el volumen de la solución tratante. A diferencia de los métodos convencionales, este sistema fue diseñado para aumentar la eficiencia de remoción sin la aplicación de energía externa, basándose en la reducción de la tensión interfacial. Los resultados demostraron un desempeño adecuado del sistema SOW, alcanzando una eficiencia de remoción del $89,46 \% \pm 0,01 \%$. Se concluye que el crudo removido posee un alto potencial de recuperación, el suelo logra niveles significativos de remediación y la formulación química es reutilizable en ciclos posteriores. Estos resultados representan la viabilidad técnica del sistema propuesto como una alternativa de bajo costo y alto impacto para la restauración de ecosistemas degradados por la actividad petrolera, promoviendo principios de economía circular en la industria de los hidrocarburos.

Palabras clave: contaminación de suelos; hidrocarburos; ingeniería ambiental; productos químicos; recuperación de recursos.

Abstract

Soil contamination caused by hydrocarbon spills during the exploitation, production, and refining phases represents a critical environmental problem that requires efficient and sustainable technological solutions. This research evaluated the capacity of Surfactant-Oil-Water (SOW) systems for the removal of crude oil from contaminated soils, using the Yaracal area in Falcón State as a case study. The methodology consisted of conducting one-dimensional formulation scans using the anionic surfactant sodium dodecyl sulfate (SDS), employing the concentration of sodium chloride (NaCl) as the main formulation variable. The objective was to determine the most effective configuration and the optimal formulation to maximize system performance under different operating conditions, such as variations in flow rate and treatment solution volume. Unlike conventional methods, this system was designed to increase removal efficiency without the application of external energy, relying instead on the reduction of interfacial tension. The results demonstrated satisfactory performance of the SOW system, achieving a removal efficiency of $89.46\% \pm 0.01\%$. It is concluded that the removed crude oil has high recovery potential, the soil reaches significant levels of remediation, and the chemical formulation can be reused in subsequent cycles. These findings demonstrate the technical feasibility of the proposed system as a low-cost, high-impact alternative for restoring ecosystems degraded by oil industry activities, while promoting circular economy principles within the hydrocarbon sector.

Keywords: soil contamination; hydrocarbons; environmental engineering; chemical products; resource recovery.

Resumo

A contaminação do solo causada por derramamentos de hidrocarbonetos durante as fases de exploração, produção e refino representa um problema ambiental crítico que requer soluções tecnológicas eficientes e sustentáveis. Esta pesquisa avaliou a capacidade de sistemas Surfactante-Óleo-Água (SOA) para a remoção de petróleo bruto de solos contaminados, utilizando a região de Yaracal, no Estado Falcón, como estudo de caso. A metodologia consistiu na realização de varreduras de formulação unidimensionais utilizando o surfactante aniônico dodecil sulfato de sódio (SDS), empregando a concentração de cloreto de sódio (NaCl) como principal variável de formulação. O objetivo foi determinar a configuração mais eficaz e a formulação ótima para maximizar o desempenho do sistema sob diferentes condições operacionais, como variações na vazão e no volume da solução de tratamento. Diferentemente dos métodos convencionais, esse sistema foi concebido para aumentar a eficiência de remoção sem a aplicação de energia externa, baseando-se na redução da tensão interfacial. Os resultados demonstraram desempenho satisfatório do sistema SOA, alcançando uma eficiência de remoção de $89,46\% \pm 0,01\%$. Conclui-se que o petróleo removido apresenta elevado potencial de recuperação, que o solo atinge níveis significativos de remediação e que a formulação química pode ser reutilizada em ciclos subsequentes. Esses achados demonstram a viabilidade técnica do sistema proposto como uma alternativa de baixo custo e alto impacto para a restauração de ecossistemas degradados pelas atividades da indústria petrolífera, promovendo simultaneamente os princípios da economia circular no setor de hidrocarbonetos.

Palavras-chave: contaminação do solo; hidrocarbonetos; engenharia ambiental; produtos químicos; recuperação de recursos.

Introducción

La contaminación y degradación de los suelos representa una de las amenazas más críticas para el uso sustentable de la tierra y el desarrollo urbano ordenado. Este fenómeno no solo impacta directamente la salud pública, sino que condiciona negativamente recursos naturales estratégicos y fundamentales para el equilibrio ecosistémico, afectando la disponibilidad de agua para consumo humano y provocando una degradación acelerada del entorno rural [1]. La pérdida de la capacidad productiva del suelo debido a contaminantes persistentes exige el desarrollo de tecnologías de restauración que sean técnica y económicamente viables.

En el contexto industrial, la contaminación por petróleo es un problema recurrente en las actividades de explotación, producción y refinación [2]. Un caso emblemático se observa en la localidad de Yaracal, estado Falcón, Venezuela, donde la existencia de pozos deshabilitados que liberan crudo liviano de manera espontánea ha generado pasivos ambientales críticos. Esta liberación incontrolada ocasiona un impacto ambiental profundo, alterando las propiedades fisicoquímicas del suelo, contaminando cuerpos de agua superficiales y subterráneos, y perjudicando severamente la biodiversidad de la flora y fauna local, lo que deriva en un riesgo latente para la salud de las comunidades circundantes [3].

Existen diversas técnicas de remediación para abordar esta problemática [4]. Entre ellas, el lavado de suelos con surfactantes se posiciona como uno de los métodos más eficaces, debido a la capacidad de estos agentes para incrementar la solubilidad de compuestos hidrofóbicos y reducir la tensión interfacial, optimizando drásticamente la eficiencia del proceso de remoción [5]. Esta tecnología destaca por ser libre de solventes orgánicos y, al lograr remover un alto porcentaje del contaminante, puede ser integrada sinérgicamente con procesos de biodegradación para alcanzar una remediación total del sitio [6], [7].

La presente investigación empleó sistemas Surfactante-Aceite-Agua (SOW) para tratar muestras de suelo contaminado provenientes de Yaracal, evaluando su capacidad de remoción de crudo liviano. El estudio evidencia el potencial de esta técnica como una alternativa robusta para solventar la problemática ambiental en la región, fundamentada en la importancia vital que representa el suelo para la vida humana y los ecosistemas. Se propone así una tecnología eco-amigable, de bajo costo y alta rentabilidad que, a diferencia de los métodos térmicos o mecánicos convencionales, no requiere la aplicación de energía externa para su funcionamiento.

Metodología

Muestreo y caracterización del sustrato impactado

El material experimental se recolectó en la localidad de Yaracal, estado Falcón, Venezuela, específicamente en el área de influencia de Mene de San Lorenzo. Esta zona se caracteriza por la presencia de pozos petroleros deshabilitados que presentan emanaciones espontáneas de crudo liviano, generando pasivos ambientales crónicos en el ecosistema circundante. Se obtuvieron muestras de suelo superficial mediante un muestreo selectivo en los puntos de mayor acumulación de hidrocarburos para asegurar una matriz representativa del impacto real en la zona.

Antes de las pruebas de lavado con sistemas SOW, las muestras fueron homogeneizadas y tamizadas para estandarizar la granulometría y asegurar la reproducibilidad de los ensayos de remediación.

Barrido de formulación unidimensional Surfactante-Aceite-Agua (SOW)

La fase inicial de la investigación consistió en la optimización termodinámica del sistema ternario para maximizar la remoción de hidrocarburos. Se diseñó un barrido de formulación unidimensional empleando un sistema modelo SDS/Kerosén/Agua, utilizando la concentración de sal (NaCl) como la variable de control de la afinidad del surfactante. El objetivo fue identificar las condiciones que favorecen la formación de microemulsiones de tipo Winsor III, caracterizadas por una tensión interfacial ultra-baja [8].

Preparación de soluciones madre y sistemas de barrido

Se prepararon soluciones madre estandarizadas de dodecil sulfato de sodio (SDS) al 10 % p/v y cloruro de sodio (NaCl) al 20 % p/v. En tubos de ensayo graduados de 20 mL, se confeccionaron los sistemas de barrido manteniendo constantes las concentraciones de SDS (1 % p/v), el cotensioactivo pentanol (4 % v/v) y el volumen de la fase oleosa (5 mL). La concentración de NaCl se varió de manera sistemática en un intervalo de 1 % al 10 % p/v para evaluar la respuesta de fase.

Evaluación del desempeño del sistema SOW y preparación del sustrato contaminado

Una vez seleccionada la formulación con mejor desempeño preliminar, esta se aplicó sobre matrices de suelo reales y sintéticas contaminadas para cuantificar su eficacia de remediación.

Caracterización y preparación del sustrato de referencia:

Para asegurar la reproducibilidad, se utilizó un sustrato arenoso como material de referencia. Se procedió a homogeneizar el tamaño de las partículas mediante un proceso de tamizado, utilizando una malla estandarizada de 0,078 pulgadas cuadradas. El sustrato fue contaminado de forma controlada para simular dos escenarios: uno con kerosén (5 mL) y otro con crudo liviano proveniente de la localidad de Yaracal (5 mL).

Preparación de la solución tratante óptima

Basado en los resultados del barrido de formulación, se prepararon 5 mL de la solución tratante optimizada. Esta solución integró todos los componentes de la formulación preseleccionada, utilizando una concentración de 6,8 % p/v de NaCl como electrolito de control, excluyendo la fase oleosa que ya se encontraba impregnada en la matriz del sustrato.

Protocolo de aplicación y evaluación interfacial

Se aplicaron los 5 mL de la solución tratante sobre el sustrato contaminado. El sistema fue sometido a un periodo de reposo de 24 horas para alcanzar el equilibrio termodinámico, permitiendo una inspección visual y fisicoquímica del comportamiento interfacial obtenido (remobilización del crudo y separación de fases).

Implementación del sistema de tratamiento a escala de laboratorio

Con el fin de validar la operatividad del método, se diseñó e implementó un sistema de tratamiento a escala de laboratorio utilizando materiales de bajo costo y recuperados, siguiendo los principios de sostenibilidad y economía circular [1].

Configuración del montaje experimental

El montaje experimental, detallado en la Figura 1, se estructuró para operar bajo un régimen de flujo asistido por gravedad y mecanismos de rebose. La configuración permitió un control de la interacción entre la solución tratante y el sustrato contaminado sin requerir la aplicación de energía mecánica externa, optimizando el desempeño del sistema SOW. Se procedió a la caracterización fisicoquímica integral de los sustratos antes y después del proceso de remediación para determinar la condición operativa adecuada y cuantificar la eficiencia de remoción.



Figura 1. Diagrama del montaje experimental a escala de laboratorio para el tratamiento de sustratos contaminados asistido por flujo gravitacional y rebose. Izquierda: detalle de recipientes de alimentación y reacción. Derecha, sistema de recolección de efluentes.

Resultados y discusión

Optimización del sistema Surfactante-Aceite-Agua (SOW)

La identificación de la formulación óptima se fundamentó en la obtención de un sistema trifásico de tipo Winsor III [9]. Como se muestra en la Figura 2, el barrido de salinidad permitió alcanzar el equilibrio hidrofílico-lipofílico (HLD), donde la movilidad del surfactante en la interfase minimiza la tensión interfacial [10]. La transición de fases observada con un 6,8 % de NaCl representa el punto de solubilización máxima, donde los volúmenes de agua y aceite interactúan de manera equitativa dentro de la microemulsión.



Figura 2. Evaluación de la respuesta de fase (Winsor) mediante barrido de salinidad (NaCl) para el sistema SDS/Kerosén/Agua.

Evaluación del desempeño de la solución tratante

La efectividad de las tecnologías de remediación está fuertemente ligada a las propiedades intrínsecas del suelo, tales como la textura y la permeabilidad. Los ensayos reportados en la Figura 3 revelaron una variabilidad significativa según la concentración de electrolito: una salinidad del 1 % logró el mayor desempeño de remoción ($92 \% \pm 1 \%$), mientras que las concentraciones del 4 % y 6,8 % presentaron eficiencias del ($40 \% \pm 1 \%$) y ($56 \% \pm 1 \%$) respectivamente. Estos resultados sugieren que, para esta matriz específica, una menor salinidad favorece la remobilización del hidrocarburo atrapado en los poros del suelo.

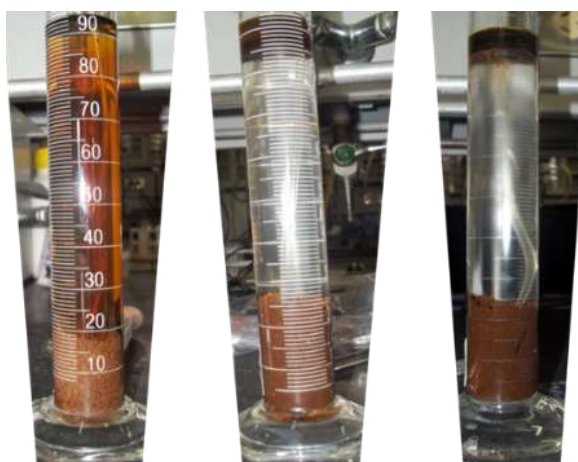


Figura 3. Comparativa visual de la eficiencia de remoción de hidrocarburos en función de la variación en la concentración de NaCl.

Remediación de suelo contaminado a escala de laboratorio

Bajo un enfoque de remediación *in situ*, se ejecutó un tratamiento por carga empleando 1 kg de sustrato en un montaje asistido por gravedad (Figura 1). El proceso permitió apreciar el desplazamiento mecánico y termodinámico de la fase orgánica por la solución tratante. Como se evidencia en la Figura 4, se registró el ascenso de gotas de hidrocarburo que, al agruparse por fuerzas de cohesión, conformaron una fase oleosa recuperable en la superficie del sistema.



Figura 4. Registro fotográfico de la coalescencia y formación de la fase oleosa superficial durante la etapa de rebose.

Cuantificación de la eficiencia y cambio de apariencia

El suelo analizado, proveniente de la zona impactada de Mene de San Lorenzo (Yaracal, Estado Falcón), fue sometido a una caracterización gravimétrica mediante el método Soxhlet [11], [12]. Los resultados de la Tabla 1 muestran un incremento drástico de la materia orgánica (MO) del 1,29 % en suelo virgen al 5,47 % en suelo contaminado, confirmando la magnitud del impacto petrolero.

Tabla 1. Caracterización gravimétrica de la materia orgánica (MO) en muestras de suelo virgen y contaminado mediante el método Soxhlet.

Suelo	MO ($P_{MO} \pm 0,01$) % p/p
Virgen	1,29
Contaminado	5,47

Tras la aplicación del tratamiento óptimo, se encontró una restauración notable de las características visuales del sustrato. La Figura 5 ilustra el cambio de apariencia, donde el suelo tratado recupera una tonalidad y textura similar a la del suelo virgen de referencia, validando la efectividad del sistema SOW para la restauración de suelos degradados por hidrocarburos livianos.



Figura 5. Análisis comparativo cualitativo de la morfología superficial del suelo en sus estados virgen, contaminado y post-tratamiento.

Optimización termodinámica y caracterización del contaminante

El barrido de formulación permitió identificar la formación de sistemas trifásicos en los rangos de salinidad de $(4,60 \pm 0,02)$ y $(7,00 \pm 0,02)$ % p/v de NaCl, consolidando el sistema óptimo en una salinidad del 6,8 %. En cuanto a la matriz del suelo de Yaracal, la caracterización gravimétrica determinó una concentración de materia orgánica (MO) inicial de $(1,29 \pm 0,01)$ % p/p para el suelo virgen y de $(5,47 \pm 0,01)$ % p/p para el suelo impactado. Esto permitió establecer que la concentración real del contaminante en la muestra es de $(4,18 \pm 0,01)$ % p/p, proporcionando la línea base para los cálculos de eficiencia de remoción.

Evaluación del desempeño y escalabilidad del tratamiento

La eficacia del lavado presentó variaciones significativas en función de la salinidad y la escala del proceso:

- El sistema con 1 % de salinidad alcanzó el mayor desempeño de remoción en fase de laboratorio con un (92 ± 1) %, mientras que el desempeño más bajo se registró en el sistema al 4 % de NaCl.
- Se logró una disminución consistente de la carga orgánica tanto en muestras pequeñas de $(20,01 \pm 0,01)$ g como en el montaje a escala de $(1,00 \pm 0,05)$ kg, validando la estabilidad del sistema SOW en diferentes volúmenes de sustrato.
- El tratamiento alcanzó un desempeño máximo de $(89,46 \pm 0,01)$ %, mientras que el valor mínimo obtenido bajo condiciones subóptimas fue de $(46,56 \pm 0,01)$ %.

Optimización de las condiciones de operación

El análisis de las variables operativas en el montaje de flujo gravitacional permitió definir los parámetros críticos para la remediación:

- Respecto a la condición óptima, el mejor desempeño se obtuvo empleando un volumen de solución tratante de 4 L con un caudal de 2,5 mL/min.
- La condición limitante del sistema propuesto, fue el descenso en la eficiencia al reducir el caudal a 1,5 mL/min, manteniendo el mismo volumen de 4 L, lo que sugiere que la cinética de desorción del hidrocarburo requiere una velocidad de flujo mínima para evitar la re-adsorción en la matriz arenosa.

Atributos de sostenibilidad y reutilización

Un resultante importante para la viabilidad económica del proyecto es que la solución tratante, además de ser neutra en pH y estar libre de solventes orgánicos, mantiene su capacidad interfacial para ser reutilizada hasta en tres cargas o ciclos de lavado consecutivos sin pérdida significativa de eficiencia. Esta característica reduce drásticamente el consumo de reactivos y la generación de efluentes, posicionando a la tecnología como una alternativa eco-amigable para la industria petrolera nacional [13], [14].

Conclusiones

Se validó la eficacia de los sistemas Surfactante-Aceite-Agua (SOW) como una tecnología viable para la remediación de suelos impactados por crudos livianos en la región de Yaracal. La identificación del equilibrio hidrofílico-lipofílico (HLD) mediante barridos de salinidad resultó determinante para alcanzar el estado de microemulsión óptimo necesario para la remobilización del hidrocarburo.

El diseño del montaje experimental a escala de laboratorio demostró que el tratamiento asistido por flujo gravitacional y rebose es suficiente para el desplazamiento de la fase orgánica, eliminando la dependencia de fuentes de energía externa. La implementación del sistema permitió una restauración significativa de las propiedades visuales y la morfología superficial del sustrato, logrando una apariencia comparable a la del suelo virgen de referencia.

Se comprobó la estabilidad termodinámica de la solución tratante, la cual mantiene sus propiedades interfaciales tras múltiples ciclos de uso, favoreciendo la economía del proceso. La formulación empleada destaca por su perfil eco-amigable, al poseer un pH neutro y estar exenta de solventes orgánicos, lo que facilita su integración con posteriores fases de biodegradación para una remediación total.

Contribución y autoría

P.V.M.: Conceptualización, dirección de la investigación, diseño de los barridos de formulación y redacción del borrador original. **P.A.J.C.:** Metodología experimental, supervisión técnica de los sistemas SOW y validación de los resultados de remoción. **M.J.P.:** Desarrollo del montaje a escala de laboratorio, adquisición de datos de flujo y procesamiento de muestras de suelo. **A.E.:** Curación de datos, análisis de métricas de desempeño y revisión crítica de las implicaciones ambientales del estudio.

Financiamiento

Este trabajo fue financiado con recursos propios, con materiales y equipos de FACyT, Universidad de Carabobo y desarrollado en el laboratorio de Petróleo, Hidrocarburos y Derivados (PHD), en colaboración de la comunidad de Yaracal del estado Falcón.

Declaración ética

Los autores declaran que el presente trabajo cumplió con las normas éticas de investigación. El estudio no involucró sujetos humanos ni experimentación animal. El manejo del crudo proveniente de Yaracal y de los residuos químicos generados (SDS y NaCl) se realizó bajo estrictos protocolos de bioseguridad y disposición de desechos de laboratorio.

Uso de inteligencia artificial

Los autores declaran que no se utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa ni tecnologías asistidas por IA para la redacción o preparación del manuscrito.

Disponibilidad de datos

Los datos crudos de los barridos de formulación, las tablas de caracterización de materia orgánica y las fotografías del montaje experimental están disponibles para su revisión bajo solicitud razonable al autor de correspondencia.

Conflictos de intereses

Los autores declaran que no poseen conflictos de intereses financieros, comerciales o institucionales que pudieran haber influido en los resultados o en la interpretación de los hallazgos presentados en esta investigación.

Referencias

- [1] P. Ekka, S. Patra, M. Upreti, G. Kumar, A. Kumar, y P. Saikia, «Land Degradation and Its Impacts on Biodiversity and Ecosystem Services», en *Land and Environmental Management through Forestry*, 1.^a ed., A. Raj, M. K. Jhariya, A. Banerjee, S. Nema, y K. Bargali, Eds., Wiley, 2023, pp. 77-101. doi: 10.1002/9781119910527.ch4.
- [2] B. A. Mekonnen, T. A. Aragaw, y M. B. Genet, «Bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil: a review on principles, degradation mechanisms, and advancements», *Front. Environ. Sci.*, vol. 12, p. 1354422, feb. 2024, doi: 10.3389/fenvs.2024.1354422.

- [3] F. J. Garbuio, J. L. Howard, y L. M. Dos Santos, «Impact of Human Activities on Soil Contamination», *Applied and Environmental Soil Science*, vol. 2012, pp. 1-2, 2012, doi: 10.1155/2012/619548.
- [4] D. Daâssi y F. Qabil Almaghribi, «Petroleum-contaminated soil: environmental occurrence and remediation strategies», *3 Biotech*, vol. 12, n.º 6, p. 139, jun. 2022, doi: 10.1007/s13205-022-03198-z.
- [5] M. Tiwari y D. B. Tripathy, «Soil Contaminants and Their Removal through Surfactant-Enhanced Soil Remediation: A Comprehensive Review», *Sustainability*, vol. 15, n.º 17, p. 13161, sep. 2023, doi: 10.3390/su151713161.
- [6] S. Varjani, A. Pandey, y V. N. Upasani, «Petroleum sludge polluted soil remediation: Integrated approach involving novel bacterial consortium and nutrient application», *Science of The Total Environment*, vol. 763, p. 142934, abr. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142934.
- [7] L. Wu *et al.*, «Mechanisms, Applications, and Risk Analysis of Surfactant-Enhanced Remediation of Hydrophobic Organic Contaminated Soil», *Water*, vol. 16, n.º 15, p. 2093, jul. 2024, doi: 10.3390/w16152093.
- [8] W. Dongqi, Y. Daiyin, W. Junda, Z. Yazhou, y Z. Chengli, «Influencing factors and microscopic formation mechanism of phase transitions of microemulsion system», *J Petrol Explor Prod Technol*, vol. 12, n.º 10, pp. 2735-2746, oct. 2022, doi: 10.1007/s13202-022-01475-4.
- [9] H. Hu, Q. Zhang, M. Tian, Y. Li, X. Han, y R. Guo, «Review: Microemulsions for the Sustainable Development of EOR», *Sustainability*, vol. 16, n.º 2, p. 629, ene. 2024, doi: 10.3390/su16020629.
- [10] A. Bashir, A. Sharifi Haddad, y R. Rafati, «A review of fluid displacement mechanisms in surfactant-based chemical enhanced oil recovery processes: Analyses of key influencing factors», *Petroleum Science*, vol. 19, n.º 3, pp. 1211-1235, jun. 2022, doi: 10.1016/j.petsci.2021.11.021.
- [11] A. Imam, S. K. Suman, D. Ghosh, y P. K. Kanaujia, «Analytical approaches used in monitoring the bioremediation of hydrocarbons in petroleum-contaminated soil and sludge», *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, vol. 118, pp. 50-64, sep. 2019, doi: 10.1016/j.trac.2019.05.023.

- [12] S. Najafi AsliPashaki y M. R. Hadjmohammadi, «Air assisted - vesicle based microextraction (AAVME) as a fast and green method for the extraction and determination of phenolic compounds in *M. officinalis* L samples», *Talanta*, vol. 195, pp. 807-814, abr. 2019, doi: 10.1016/j.talanta.2018.11.102.
- [13] A. A. P. Selva Filho, A. Converti, R. D. C. F. Soares Da Silva, y L. A. Sarubbo, «Biosurfactants as Multifunctional Remediation Agents of Environmental Pollutants Generated by the Petroleum Industry», *Energies*, vol. 16, n.º 3, p. 1209, ene. 2023, doi: 10.3390/en16031209.
- [14] J.-H. Kwon *et al.*, «Recent advancement in enhanced soil flushing for remediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil: a state-of-the-art review», *Rev Environ Sci Biotechnol*, vol. 22, n.º 3, pp. 679-714, sep. 2023, doi: 10.1007/s11157-023-09657-0.

Descargo de responsabilidad

Los artículos publicados en la revista *Saastal* representan únicamente las opiniones de los autores. La Editorial Unión Científica, su equipo editorial y sus revisores no se hacen responsables del contenido, las interpretaciones o las consecuencias derivadas de la aplicación de los métodos o conclusiones incluidas en los trabajos. Todas las publicaciones se rigen por las políticas éticas de la editorial.