

Recovery of soils contaminated by hydrocarbons using bacterial biomass: Systematic review and meta-analysis

Leonel F. B. Acruta Paredes, Angie Y. Leyva Lira, Carlos A. Castañeda Olivera, Dr.
Universidad Cesar Vallejo, Campus Los Olivos, Lima, Perú
leonelacruta@gmail.com, yadiraleyvalira@gmail.com, caralcasto@gmail.com

*Abstract– Hydrocarbons are considered one of the most toxic pollutants, since they generate harmful substances for the soil, which leads to the deterioration of its structure. The objective of this research was to evaluate, through a systematic review and meta-analysis, the efficiency of the use of bacterial biomass for the remediation of soils contaminated by hydrocarbons. The methodology was based on a quantitative approach, of applicative type and non-experimental design. For the collection of information, articles published between January 2011 and September 2021 were considered, using the Web of Science and Scopus databases. The meta-analysis was performed using Review Manager 5.4 software (Revman). The results revealed that the included investigations showed considerable statistical heterogeneity ($I^2 = 91\%$) and that the highest percentage of hydrocarbon adsorption (100%) was achieved by Jiang et al. (2015) using *Bacillus Thuringiensis*, having a concentration of 500 mg/kg phenanthrene in soil. Finally, it is concluded that the application of bacterial biomass is efficient for the adsorption of hydrocarbons present in contaminated soils, and it is an environmentally friendly technique that does not generate harmful products.*

Keywords-- systematic review, meta-analysis, bacterial biomass, hydrocarbon removal, soil remediation.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.769>
ISBN: 978-628-95207-0-5 **ISSN:** 2414-6390

Recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos utilizando biomasa bacteriana: Revisión sistemática y meta-análisis

Leonel F. B. Acruta Paredes, Angie Y. Leyva Lira, Carlos A. Castañeda Olivera, Dr.
Universidad Cesar Vallejo, Campus Los Olivos, Lima, Perú
leonelacruta@gmail.com, yadiraleyvalira@gmail.com, caralcasta@gmail.com

Resumen– Los hidrocarburos son considerados uno de los contaminantes más tóxicos, puesto que generan sustancias nocivas para el suelo, lo que conduce al deterioro de su estructura. La investigación tuvo como objetivo evaluar mediante una revisión sistemática y el meta-análisis la eficiencia del uso de biomasa bacteriana para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos. La metodología se basó en un enfoque cuantitativo, de tipo aplicativo y diseño no experimental. Para la recolección de información se consideró artículos publicados entre enero de 2011 hasta setiembre 2021, utilizándose las bases de datos Web of Science y Scopus. El meta-análisis se realizó mediante el software Review Manager 5.4 (Revman). Los resultados revelaron que las investigaciones incluidas mostraron una heterogeneidad estadística considerable ($P = 91\%$) y que el mayor porcentaje de adsorción de hidrocarburos (100%) fue alcanzado por Jiang et al. (2015) utilizando *Bacillus Thuringiensis*, teniendo una concentración de 500 mg/kg de fenantreno en el suelo. Finalmente, se concluye que la aplicación de biomasa bacteriana es eficiente para la adsorción de hidrocarburos presentes en suelos contaminados, y es una técnica ambientalmente amigable que no genera productos nocivos.

Palabras claves-- revisión sistemática, meta-análisis, biomasa bacteriana, remoción de hidrocarburo, recuperación de suelos

Abstract– Hydrocarbons are considered one of the most toxic pollutants, since they generate harmful substances for the soil, which leads to the deterioration of its structure. The objective of this research was to evaluate, through a systematic review and meta-analysis, the efficiency of the use of bacterial biomass for the remediation of soils contaminated by hydrocarbons. The methodology was based on a quantitative approach, of applicative type and non-experimental design. For the collection of information, articles published between January 2011 and September 2021 were considered, using the Web of Science and Scopus databases. The meta-analysis was performed using Review Manager 5.4 software (Revman). The results revealed that the included investigations showed considerable statistical heterogeneity ($P = 91\%$) and that the highest percentage of hydrocarbon adsorption (100%) was achieved by Jiang et al. (2015) using *Bacillus Thuringiensis*, having a concentration of 500 mg/kg phenanthrene in soil. Finally, it is concluded that the application of bacterial biomass is efficient for the adsorption of hydrocarbons present in contaminated soils, and it is an environmentally friendly technique that does not generate harmful products.

Keywords-- systematic review, meta-analysis, bacterial biomass, hydrocarbon removal, soil remediation.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, los hidrocarburos se consideran como un peligro por causar impactos negativos al ambiente, afectando el desarrollo de diferentes especies de animales y plantas, producto de los derrames accidentales. Los suelos contaminados por hidrocarburos se caracterizan por no tener intercambio gaseoso con la atmósfera, generando alteración de los parámetros como pH, evaporación, capilaridad, temperatura, humedad, materia orgánica y textura del suelo [12].

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos considerados hidrofóbicos y lipofílicos por ser insolubles en agua, pero solubles en presencia de solventes orgánicos. Por ello, son denominados como un contaminante con alto grado de peligrosidad que afecta a diferentes ecosistemas, interfiriendo con el crecimiento y desarrollo adecuado de la flora y fauna [13]. El Perú no es ajeno a esta problemática debido a que en el año 2000 hasta el 2019 se suscitaron 474 derrames de petróleo y sus derivados en la Amazonía peruana, dentro de los cuales el 65% tiene como causa principal el desgaste de ductos y otras fallas de sus procesos [16].

Recientemente, la biorremediación se viene aplicando como una alternativa a métodos fisicoquímicos, por ser una opción segura y rentable. Se han desarrollado técnicas de biorremediación para aprovechar el potencial que tienen ciertas bacterias para degradar y desintoxicar contaminantes específicos. El impacto ambiental que produce la aplicación de biomasa bacteriana en suelos contaminados por hidrocarburos es una opción eco-amigable que cumple la función de mitigación y/o remoción de este contaminante vertido en el suelo. Las bacterias con mayor eficiencia de remoción de hidrocarburos son el *Bacillus Thuringiensis* y la *Pseudomonas* sp (Jiang et al. 2015, Mitter et al. 2019 y Salehi et al. 2019). La producción de biomasa bacteriana es un método de bajo costo debido a que este producto se obtiene a partir de un ecosistema natural y de residuos provenientes de actividades humanas. En base a lo mencionado, se busca demostrar a la sociedad en general la importancia del uso de biomasa bacteriana para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos, con la intención de aportar a la mejora continua de los cultivos y recuperar los suelos expuestos a este contaminante.

La justificación de la presente investigación se basa en la selección de estudios elaborados sobre el uso de biomasa

bacteriana para la recuperación de suelos afectados por derrame de hidrocarburo. La biomasa bacteriana cumple la función de mitigación y/o remoción de este contaminante debido a su capacidad de remover el hidrocarburo vertido en el suelo, siendo así un método eco-amigable y de muy bajo costo debido a que su elaboración se adquiere a partir de ecosistemas naturales y residuos provenientes de actividades humanas.

Por lo tanto, la presente investigación evaluó mediante revisión sistemática y meta-análisis el uso de biomasa bacteriana para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos entre los años 2011 a 2021. Para ello, consideró lo siguiente: (a) Identificar las características físico-químicas de la biomasa bacteriana para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos, (b) Identificar las propiedades físico-químicas del suelo contaminado por hidrocarburos, (c) Determinar qué tipos de hidrocarburos han sido adsorbidos por biomasa bacteriana, (d) Identificar que biomasas bacterianas son eficientes para la recuperación de suelos contaminados.

II. METODOLOGÍA

A. Enfoque, tipo y diseño de la investigación

La investigación tuvo un enfoque cuantitativo porque incluyó la interpretación al sujeto de estudio, lo que significa que el investigador interpreta los fenómenos teniendo en cuenta los significados de otros autores y sus datos obtenidos [2].

La investigación fue de tipo aplicada porque busca generar conocimiento teniendo en cuenta problemas sociales y basándose principalmente en hallazgos tecnológicos de la investigación básica considerando la teoría y el producto [5].

El diseño de la investigación fue no experimental de revisión documental porque se evitó la manipulación de las variables, enfocándose en la investigación de los fenómenos tal cual se den en su contexto natural, y posteriormente realizar un análisis de lo estudiado [1].

B. Selección de documentos

Para el presente trabajo de investigación se siguió la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews) que tiene como propósito la mejora de la calidad y autenticidad de la revisión sistemática.

B.1. Fuentes de información

La revisión sistemática de la presente investigación siguió la propuesta de MOOSE (Meta-analysis Of Observational Studies in Epidemiology). Los artículos científicos se extrajeron de fuentes de información confiables, tales como, Web of Science y Scopus. Se procuró que las investigaciones obtenidas no superasen los 10 años de antigüedad.

B.2. Estrategia de búsqueda

La búsqueda de artículos relevantes se realizó teniendo en cuenta los resúmenes, títulos y palabras claves de las investigaciones. Para ello se aplicó la siguiente cadena de

búsqueda: TITLE-ABS-KEY (biomass AND (bacteria OR bacterial OR bacterium) AND ("contaminated soil" OR "soil contamination*" OR "soil pollution*" OR "polluted soil") AND (treatment OR remediat* OR recover* OR repair* OR *remediation OR control) AND hydrocarbons).

Después de la obtención de artículos se hizo una revisión más específica de formar personal con el fin de eliminar investigaciones que no tengan los datos, características o criterios de estudio con respecto al título planteado.

C. Evaluación de la calidad

La evaluación de la calidad de las investigaciones más relevantes se realizó mediante la aplicación de la escala Newcastle–Ottawa que analiza las investigaciones de acuerdo a 3 categorías: selección, comparabilidad y resultado. La primera categoría identifica que la muestra sea representativa a la población; la segunda categoría, la lista de verificación analizó la comparabilidad de los artículos; y en la tercera categoría se investigó el resultado de las investigaciones más importantes.

D. Descripción de estudios

En todos los estudios seleccionados caracterizaron la biomasa bacteriana según sus propiedades fisicoquímicas; asimismo, caracterizaron el suelo físicamente y químicamente, y determinaron el porcentaje de adsorción de hidrocarburo. Para ello, se resumieron todos los estudios en tablas, estableciendo la siguiente información:

- Características de los estudios incluidos en la revisión sistemática y meta-análisis
- Características de los tipos de biomasa bacteriana
- Caracterización de los suelos contaminados por hidrocarburos
- Condiciones operacionales del proceso de adsorción de hidrocarburos
- Porcentaje de adsorción de hidrocarburos

E. Método de análisis de datos

Para la realización del análisis de datos se usó el programa RevMan 5.4.1. (Review Manager), el cual corresponde a la Colaboración de Cochrane. Para la elaboración de los meta-análisis se utilizaron datos dicotómicos (Fixed), ya que brindan más peso al menor número de estudios seleccionados ($n < 20$), y el efecto se estimó con un nivel de confianza del 95% de heterogeneidad.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Búsqueda de información y caracterización de estudios

En la Figura 1 se muestra el diagrama de flujo del proceso de obtención de las investigaciones incluidas para el meta-análisis según la escala Newcastle – Ottawa modificada. Se identificaron un total de 281 artículos preliminares a través de la búsqueda de información en las bases de datos Web of Science y Scopus. Los artículos preliminares fueron evaluados

de acuerdo a los criterios de inclusión tanto en el título como en el resumen, obteniéndose 215 investigaciones (66 investigaciones excluidas). Luego, estas investigaciones seleccionadas volvieron a ser evaluadas de acuerdo a los criterios de inclusión y exclusión en el texto completo, obteniéndose 10 investigaciones (205 investigaciones excluidas).

En la Figura 1 se presenta el diagrama de flujo del proceso de obtención de las investigaciones incluidas para el meta-análisis



Fig. 1 Diagrama de flujo del proceso de obtención de investigaciones para el meta-análisis.

B. Revisión sistemática

B.1. Descripción de los estudios

En la Tabla 1 se muestran los 10 artículos seleccionados en la investigación para el meta-análisis, los cuales fueron publicados entre los años 2011 y 2021. Dentro de la muestra de estudio se identificaron las diferentes biomasa bacterianas utilizadas para la adsorción de hidrocarburos en suelos contaminados.

En la totalidad de las investigaciones incluidas, los autores refieren que el uso de biomasa bacteriana logró porcentajes de

adsorción de hidrocarburos en suelos contaminados mayores al 90% de acuerdo a las condiciones operacionales, siendo las más destacadas y de mayor influencia la temperatura, tiempo de contacto, dosis y pH.

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DE LOS ESTUDIOS INCLUIDOS EN LA REVISIÓN SISTEMÁTICA Y META-ANÁLISIS

Biomasa bacteriana	Tipo de análisis estadístico	Ámbito geográfico	Autores
<i>Micrococcus Varians</i>	No menciona el tipo de análisis estadístico.	China	Bisht et al. 2014
<i>Enterobacter sp.</i>	No menciona el tipo de análisis estadístico.	Pakistán – Punjab	Ejaz et al. 2021
<i>Achromobacter</i>	ANOVA bivariado	México	Gonzales et al. 2019
<i>Actinobacterias</i>	PCoA (análisis de coordenadas principales) y la prueba de rangos múltiples de Duncan	China – Beijing	Hou et al. 2021
<i>Bacillus Thuringiensis</i>	Microsoft Office Excel 2010. ANOVA bidireccional al análisis seguido de la prueba de rango múltiple de Duncan (DMRT)	China	Jiang et al. 2015
<i>Enterobacter hormaechei</i>	SPSS (Version 18.0 para Windows) Microsoft Office Excel 2010	Irán – Arak	Koolivand et al. 2020
<i>Mycobacterium</i>	ANOVA – SPSS 20.0.	China	Li et al. 2021
<i>Pseudomonas sp.</i>	Software SAS v9.3 Prueba de Shapiro-Wilk. Análisis de la varianza (ANOVA)	Canadá – Saskatoon	Mitter et al. 2019
<i>Pseudomonas sp.</i>	SPSS, versión 19 ANOVA	Iran – Shiraz	Salehi et al. 2019
<i>Ochrobactrum sp.</i>	SPSS (Versión 18.0 para Windows)	China	Xu et al. 2019

B.1.1. Porcentaje de adsorción de hidrocarburos

La Tabla 2 muestra los resultados de las investigaciones sobre el uso de biomasa bacteriana para la adsorción de hidrocarburos presentes en suelo, encontrándose en un rango de 33 a 100%. Finalmente, se indica el porcentaje de adsorción de hidrocarburos detallando el tipo de biomasa bacteriana, tipo de hidrocarburo y concentración de hidrocarburo (mg/kg).

TABLA II
PORCENTAJE DE ADSORCIÓN DE HIDROCARBUROS

Biomasa bacteriana	Hidrocarburo	Concentración de hidrocarburos (mg/kg)		Porcentaje de adsorción (%)		Autores
		Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 1	Ensayo 2	
<i>Micrococcus Varians</i>	Hidrocarburo aromático policíclicos (HAP)	25	14	43.1	33	Bisht et al. 2014
<i>Enterobacter sp.</i>	Hidrocarburo aromático policíclicos (HAP)	1000	2000	54	44	Ejaz et al. 2021
<i>Achromobacter</i>	Hidrocarburo total de petróleo (TPH)	48.75	76.6	95	37.3	Gonzales et al. 2019
<i>Actinobacterias</i>	Hidrocarburo total de petróleo (TPH)	2751	1651	72.2	76.6	Hou et al. 2021
<i>Bacillus Thuringiensis</i>	Fenantreno	200	500	100	95.1	Jiang et al. 2015
<i>Enterobacter hormaechei</i>	Hidrocarburo total de petróleo (TPH)	10	20	65.8	81.5	Koolivand et al. 2020
<i>Mycobacterium</i>	Hidrocarburo aromático policíclicos (HAP)	200	150	76	68	Li et al. 2021
<i>Pseudomonas sp.</i>	Petróleo crudo	10000	20000	90	100	Mitter et al. 2019
<i>Pseudomonas sp.</i>	Pireno	150	300	96	100	Salehi et al. 2019
<i>Ochrobactrum sp.</i>	Hidrocarburo aromático policíclicos (HAP)	100	200	98	97.5	Xu et al. 2019

En la Tabla 2 se identificó que Ejaz et al. (2021) presentó diferentes unidades, realizándose la conversión de ppm a mg/kg con la finalidad de que todos los datos sean homogéneos al momento de realizar el análisis estadístico. La concentración de hidrocarburo mencionado por Koolivand et al. (2020) tiene un valor mínimo (10 mg/kg) a comparación de los 9 restantes.

En cuatro artículos de investigaciones, se observó que el hidrocarburo más estudiado es el HAP (hidrocarburo aromático policíclico), debido a que es una sustancia orgánica difícil de degradar. Seguidamente, identificamos cuatro

artículos de investigaciones que consideran el petróleo crudo y dos estudios que analizan hidrocarburos de manera individual.

El porcentaje de adsorción haciendo uso de biomasa bacteriana tiene una gran eficiencia, observándose que el mínimo valor porcentual es de 33% y el máximo de 100% en las investigaciones realizadas por Bisht et al. (2014) y Jiang et al. (2015), respectivamente.

B.2. Concentración de hidrocarburos

Las concentraciones de hidrocarburo en el suelo variaron en cada investigación realizada. En la Figura 2 se muestran los

artículos de investigación que presentó baja concentración de hidrocarburos en el rango de 2 a 20 mg/kg, 2 investigaciones mostraron concentración moderada con un rango de 20 a 80

mg/kg y 7 investigaciones presentaron una alta concentración de 80 a 20000 mg/kg.

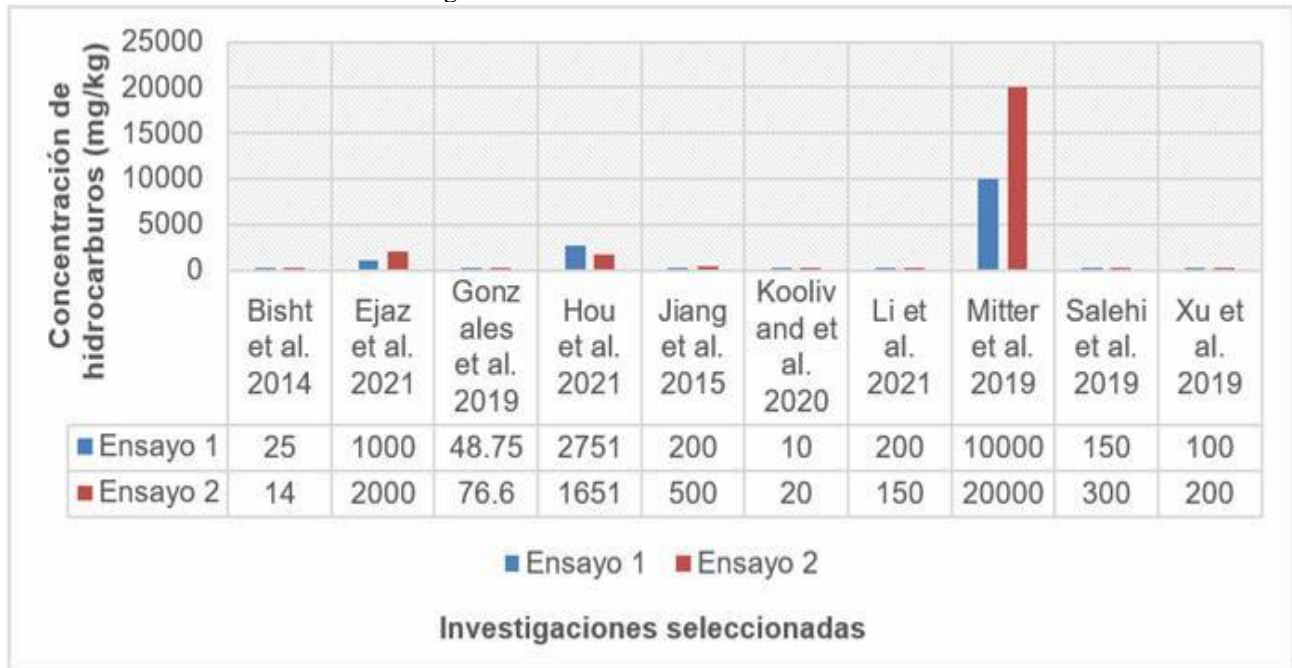


Fig. 2 Concentración de hidrocarburos

En la Figura 2 se observó 1 artículo de investigación que presentó baja concentración de hidrocarburos en el rango de 2 a 20 mg/kg, 2 investigaciones mostraron concentración moderada con un rango de 20 a 80 mg/kg y 7 investigaciones demostraron una alta concentración de 80 a 20000 mg/kg.

Asimismo, se observa en cada una de las investigaciones una disminución significativa de la concentración de los hidrocarburos mediante el uso de biomasa bacteriana obtenida de distintas materias primas.

C. Meta-análisis

C.1. Evaluación de la calidad de las investigaciones

Se evaluaron las diez investigaciones seleccionadas que fueron ingresadas al Software RevMan 5.4.1. Se determinó cuál es la concentración que adsorbió mayor cantidad de hidrocarburos, los cuales contribuyeron a la valoración de los porcentajes de adsorción. Se comprobó que las concentraciones varían debido a la aplicación de la biomasa bacteriana, existiendo una relación directamente proporcional entre las concentraciones de los hidrocarburos y el porcentaje de adsorción.

C.2. Heterogeneidad

La heterogeneidad de las investigaciones se evaluó a través del análisis visual del diagrama, y se observó que en las 10 investigaciones incluidas hay una heterogeneidad

significativa (I² =91%, p<0.00001) de acuerdo a efectos fijos (Fixed). La heterogeneidad del meta-análisis indicó que la metodología de los estudios es diferente, observándose diferencias en el diseño de la investigación, las muestras utilizadas y el tipo de análisis estadístico empleado para la obtención del porcentaje.

Por otro lado, el polígono del meta-análisis se encontró alejado de la línea de referencia, y al comparar con el “p” valor <0.00001 (Z=89.08) se observó que hay una diferencia significativa entre las concentraciones. Asimismo, de acuerdo a los valores de peso (weight) se observó que los estudios de Mitter et al. (2019) presentaron el mayor porcentaje de adsorción de hidrocarburos con un 77.2%.

La razón de momio (Odds Ratio) evalúa el efecto del tratamiento de una población. Por ello, para realizar una adecuada interpretación se utilizó los siguientes intervalos:

- Odds < 1: El tratamiento disminuye el porcentaje de adsorción.
- Odds > 1: El tratamiento aumenta el porcentaje de adsorción.
- Odds = 1: El tratamiento no presenta ninguna variación. El meta-análisis de las investigaciones obtuvo un valor de Odds Ratio de 0.26.

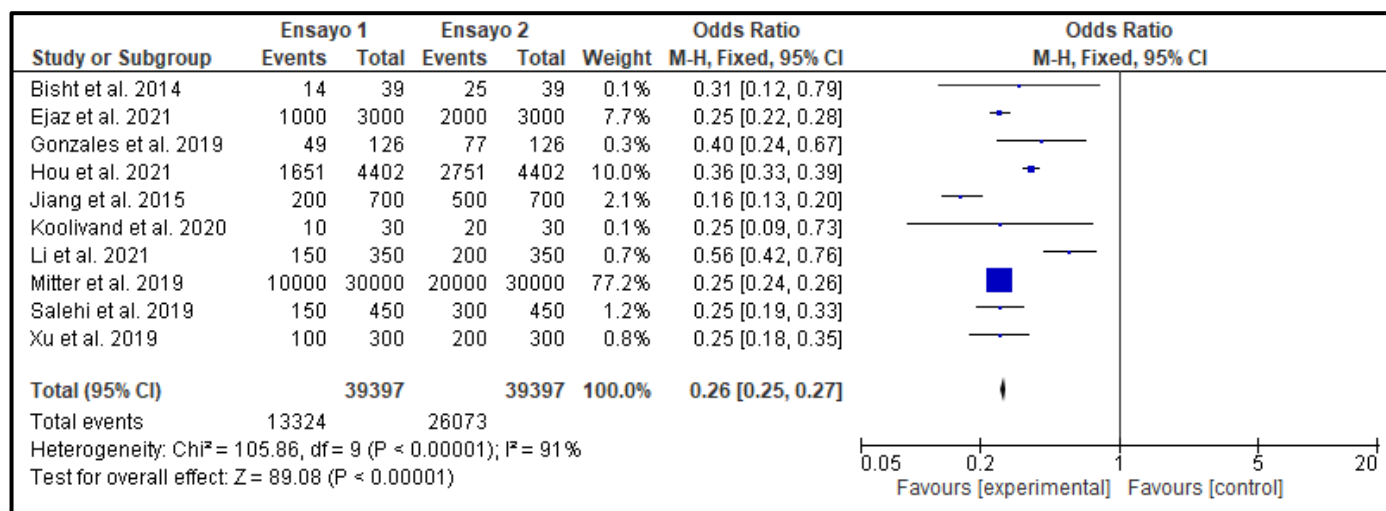


Fig. 3 Meta-análisis de las concentraciones de hidrocarburos respecto al porcentaje de adsorción Concentración de hidrocarburos

IV. CONCLUSIONES

El uso de biomasa bacteriana fue favorable para la adsorción de hidrocarburos en el suelo. La eficiencia de adsorción de hidrocarburo fue en el rango de 33 al 100%, obteniéndose los mayores valores (100%) en los estudios de Jiang et al. (2015) empleando *Bacillus Thuringiensis* y en el de Mitter et al. (2019) y Salehi et al. (2019) que utilizaron *Pseudomonas* sp como biomasa bacteriana.

1. Las características físico-químicas estudiadas en las biomasa bacterianas fueron temperatura (°C), masa (g) y humedad (%).
2. Las características físico-químicas del suelo mayormente estudiadas fueron pH, humedad (%), materia orgánica (%), temperatura (°C) y concentración de hidrocarburos (mg/kg), deduciendo que a una mayor temperatura entre 25 y 30 °C se obtiene mayor porcentaje de remoción de hidrocarburos.
3. Se encontraron distintos tipos de hidrocarburos en cada artículo de investigación, tales como los aromáticos policíclicos (HAP), fenantreno, petróleo crudo y pireno (PYR). Los tipos de hidrocarburo frecuentemente adsorbidos con el uso de biomasa bacteriana son los aromáticos policíclicos (HAP) y fenoles debido a que estos contaminantes se generan a partir de actividades naturales y antropogénicas.
4. La biomasa bacteriana con mayor porcentaje de adsorción dentro de los artículos analizados fue la *Pseudomonas* sp, *Ochrobactrum* sp. y *Bacillus Thuringiensis* con valores 98, 100 y 100%, respectivamente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad César Vallejo, Campus Los Olivos, Lima-Perú por el soporte brindado para la realización y difusión de la investigación.

REFERENCIAS

- [1] Agudelo, G., Aigner, M., y Ruiz, R., 2010. Experimental y no-experimental. La sociología en sus escenarios. UDEA. 18, 1-3.
- [2] Álvarez, S. et al., 2014. Reflexiones acerca de los aspectos epistemológicos de la agroecología. Cuadernos de desarrollo rural. vol. 11, pp. 55-74.
- [3] Bisht, S. y Kumar, V., 2014. Inoculant technology in *Populus deltoides* rhizosphere for effective bioremediation of Polyaromatic hydrocarbons (PAHs) in contaminated soil, Northern India (2014). Emirates Journal of Food and Agriculture, 26 (9), pp. 786-799.
- [4] Ejaz, M. et al., 2021. Isolation and Characterization of Oil-Degrading *Enterobacter* sp. from Naturally Hydrocarbon-Contaminated Soils and Their Potential Use against the Bioremediation of Crude Oil. Applied Sciences 11, no. 8: 3504.
- [5] Fuentes, L., Amezcua, C. y Torres, P., 2018. Application of double filtration with granular activated carbon for Atrazine reduction on water treatment processes. Revista DYNA. vol. 85, no. 205, pp. 184-190.
- [6] Gonzales, M., Rivera, M. y Trujillo, A., 2019. Decontamination of soil containing oil by natural attenuation, phytoremediation and chemical desorption. International Journal of Phytoremediation, 21:8, 768-776.
- [7] Hou, J. et al., 2021. Soil microbial community and association network shift induced by several tall fescue cultivars during the phytoremediation of a petroleum hydrocarbon-contaminated soil. Science of the Total Environment. Volume 792.
- [8] Jiang, J. et al., 2015. Combined remediation of Cd-phenanthrene co-contaminated soil by *Pleurotus cornucopiae* and *Bacillus thuringiensis* FQ1 and the antioxidant responses in *Pleurotus cornucopiae*. Volumen 120, pp. 386-393
- [9] Koolivand, A. et al., 2020. Effective scale up of oily sludge bioremediation from a culture based medium to a two phase composting system using an isolated hydrocarbon degrading bacterium: effect of two step bioaugmentation. Journal of Material Cycles and Waste Management. Volume 22, 1475-1483.
- [10] Li, N. et al., 2021. Enhanced phytoremediation of PAHs and cadmium contaminated soils by a *Mycobacterium*. Science of the Total Environment, volume 754.
- [11] MITTER, E. et al., 2019. Potential use of endophytic root bacteria and host plants to degrade hydrocarbons. International Journal of Phytoremediation. Volume 21, pp. 6-9.
- [12] ORDÓÑEZ, B., Didier Arlington et al., 2018. Biodegradación de hidrocarburos alifáticos saturados por microorganismos aislados de suelo contaminado con derivados del petróleo. Rev. cien. vol.22, n.2, pp.33-44.

- [13] PINO, R., Nancy J. et al., 2012. Comparación entre bioestimulación y bioaumentación para la recuperación de suelos contaminados con diésel. Rev. P+L. vol.7, n.1, pp.101-108.
- [14] SALEHI, N. et al., 2020. The effect of different levels of leachate on phytoremediation of pyrene-contaminated soil and simultaneous extraction of lead and cadmium. Chemosphere. Volumen 246, pp. 9-15.
- [15] Sierra, Y., 2020. Nuevo informe indica que más de 400 derrames de petróleo afectaron la Amazonía peruana. MONGABAY.
- [16] XU, C. et al., 2020. Enhanced phytoremediation of PAHs-contaminated soil from an industrial relocation site by *Ochrobactrum* sp. Environ Sci Pollut Res. Volume 27, 8991–8999.