

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), enero-febrero 2025,
Volumen 9, Número 1.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i1

ABSORCIÓN DE PETRÓLEO CRUDO CON MATERIALES CELULÓSICOS DE ALTA DISPONIBILIDAD EN LA REGIÓN CENTRO DEL ESTADO DE VERACRUZ, MÉXICO

**CRUDE OIL ABSORPTION WITH HIGH
DISPONIBILITY CELLULOSIC MATERIALS IN THE
CENTRAL REGION OF VERACRUZ STATE, MEXICO**

David Arroyo Acosta
Tecnológico Nacional de México

David Reyes González
Tecnológico Nacional de México

Guadalupe Rodríguez Martínez
Tecnológico Nacional de México

Arturo Bueno Tokunaga
Tecnológico Nacional de México

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i1.16171

Absorción de Petróleo Crudo con Materiales Celulósicos de Alta Disponibilidad en la Región Centro del Estado de Veracruz, México

David Arroyo Acosta¹darroyoa@itsm.edu.mx<https://orcid.org/0000-0001-6308-6452>Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico Superior de Misantla
México**David Reyes González**dreyesg@itsm.edu.mx<https://orcid.org/0000-0001-6400-5984>Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico Superior de Misantla
México**Guadalupe Rodríguez Martínez**grodriguez@itsm.edu.mx<https://orcid.org/0009-0007-1984-5555>Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico Superior de Misantla
México**Arturo Bueno Tokunaga**arturobueno@uadec.edu.mx<https://orcid.org/0000-0002-7658-4490>CIGA- Universidad Autónoma de Coahuila
México

RESUMEN

La actividad de la industria petrolera puede tener consecuencias negativas para el medio ambiente y la salud humana. Los derrames de petróleo son uno de los principales riesgos asociados a esta actividad, ya que al presentarse estos derrames de petróleo en los cuerpos de agua dan lugar a una grave amenaza para los ecosistemas marinos y las comunidades costeras. Para reducir los efectos negativos de estos incidentes, es necesario implementar técnicas de contención y limpieza efectivas; además, el petróleo puede afectar a la salud humana, ya que sus componentes tóxicos pueden ser absorbidos a través de la piel o inhalados, causando intoxicaciones y daños severos a la salud. Este trabajo presenta un estudio del potencial aprovechamiento de residuos agroindustriales y residuos madereros, para ser utilizados como absorbentes celulósicos, evaluando su potencial con un diseño factorial 3³, donde los factores a considerar son el tipo de material celulósico absorbente (olote, aserrín y fibra de coco), tamaño de partícula en relación a un proceso de cribado (< malla #16, < malla #30 y < malla #50) y la densidad API del aceite crudo (37 °API, 31 °API y 27 °API). Determinando la configuración adecuada de los materiales celulósicos con mejor característica de absorción, mediante un análisis estadístico del diseño experimental. Los resultados mostraron la eficiencia de los residuos de origen celulósico para absorber hidrocarburo de derrames petroleros, siendo el aserrín el que mejor desempeño mostró, adicionalmente se observó que la densidad API no es un factor que impacte en la capacidad de absorción de estos materiales, indicando que esta estrategia en una gran variedad de derrames.

Palabras clave: residuos agroindustriales, capacidad absorbente, remediación, derrames de petróleo

¹ Autor principal.

Correspondencia: darroyoa@itsm.edu.mx

Crude oil Absorption with High Disponibility Cellulosic Materials in the Central Region of Veracruz State, Mexico

ABSTRACT

The activity of the oil industry can have negative consequences for the environment and human health. Oil spills are one of the main risks associated with this activity, since these oil spills occur in bodies of water, they give rise to a serious threat to marine ecosystems and coastal communities. To reduce the negative effects of these incidents, it is necessary to implement effective containment and cleaning techniques; In addition, oil can affect human health, as its toxic components can be absorbed through the skin or inhaled, causing poisoning and severe damage to health. This paper presents a study of the potential use of agro-industrial waste and wood waste to be used as cellulosic absorbents, evaluating their potential with a factorial design 33, where the factors to be considered are the type of absorbent cellulosic material (olote, sawdust and coconut fiber), particle size in relation to a sieving process (< mesh #16, < #30 mesh and < #50 mesh) and the API density of the crude oil (37 °API, 31 °API and 27 °API). Determining the appropriate configuration of cellulose materials with the best absorption characteristics, through a statistical analysis of the experimental design. The results showed the efficiency of cellulosic waste to absorb hydrocarbon from oil spills, with sawdust showing the best performance, additionally it was observed that API density is not a factor that impacts the absorption capacity of these materials, indicating that this strategy in a wide variety of spills.

Keywords: agro-industrial residues, absorbant capacity, remediation, oil spills

*Artículo recibido 05 diciembre 2024
Aceptado para publicación: 25 enero 2025*



INTRODUCCIÓN

La industria petrolera es una actividad de gran relevancia a nivel mundial, según la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) (2022) la producción mundial de petróleo asciende a 86,152 miles de barriles diarios (mbd), lo que genera significativos ingresos y empleos para los países productores, contribuyendo al desarrollo económico, además es una fuente de energía fundamental para la sociedad, utilizado en la producción de combustibles, fertilizantes, plásticos, medicamentos y otros productos. En México esta industria es considerada motor de la economía del país, por la derrama económica que representa (Badillo, 2023).

Sin embargo, la actividad de la industria petrolera también puede tener consecuencias negativas para el medio ambiente y la salud humana. Los derrames de petróleo son uno de los principales riesgos asociados a esta actividad. Estos derrames pueden ocurrir durante la extracción, transporte y refinación del petróleo, planteando riesgos adversos para los ecosistemas acuáticos y terrestres, así mismo para la salud humana, pueden tener efectos devastadores en la vida marina, la calidad del agua y el equilibrio ecológico, lo que representa una preocupación mundial que requiere soluciones urgentes (Boran, 2017; Medina-Moreno et al., 2014; Tormoehlen et al., 2014).

En la actualidad, México se enfrenta a varios desafíos relacionados con el derrame de petróleo. Estos incidentes, en su mayoría accidentales, ocurren durante diversas operaciones como exploración, almacenamiento, refinamiento y transporte. Sin embargo, el transporte de hidrocarburos presenta un mayor riesgo debido a los factores externos y de operación que pueden desencadenar estos desastres (Tiselius y Magnusson, 2017). Además, durante las últimas dos décadas, el país ha sido afectado por acciones terroristas dirigidas a oleoductos e instalaciones petroleras. Aunque estos ataques han disminuido en la actualidad, los impactos ambientales persisten en los diferentes ecosistemas. Se estima que aproximadamente dos millones de barriles de crudo y sus derivados han sido expuestos al medio ambiente en territorio nacional, afectando fuentes hídricas, suelos, aire, fauna y vegetación.

En la actualidad, existen diversas técnicas utilizadas para la remoción del petróleo en el agua, aunque muchas de ellas presentan limitaciones. Algunas de estas técnicas incluyen el uso de barreras y dispersantes en el derrame de petróleo.

Sin embargo, a menudo estas técnicas resultan poco eficientes, pueden ser tóxicas y peligrosas para el ambiente, también surge la preocupación acerca de cómo manejar adecuadamente los desechos generados por estas operaciones (Alabresm et al., 2018; Kleindienst y col., 2015).

El interés por la aplicación de absorbentes de petróleo ha aumentado significativamente, lo que ha dado lugar a un número creciente de estudios en este campo. Diversos trabajos han puesto de manifiesto que los materiales celulósicos se pueden utilizar eficazmente como absorbentes en escenarios de derrames (Sardi et al., 2020, p. 30). Esta expansión en el uso de absorbentes se puede atribuir a sus altas capacidades de sorción, que contribuyen a la restauración de los ambientes marinos y la recuperación del petróleo perdido.

Además, los absorbentes son rentables y ofrecen posibilidades de regeneración y reutilización (Yáñez y Bárcenas, 2012).

En términos generales, los materiales absorbentes se pueden clasificar en materiales inorgánicos, orgánicos sintéticos y orgánicos naturales (Dong et al., 2012, p. 36). Actualmente, los absorbentes más aplicados son de origen sintético, como las espumas de poliuretano (Li, Yin, & Li, 2019, p. 19). Sin embargo, en los últimos años se han preferido los absorbentes naturales celulósicos, debido a su abundancia y biodegradabilidad (Redonda-Deceano et al., 2022).

La celulosa es un material renovable y biodegradable que puede derivarse de una variedad de fuentes, incluidas plantas, algas y bacterias. Sus propiedades únicas, como su alta capacidad de sorción y reactividad química, lo convierten en un candidato ideal para la absorción y eliminación de aceites (Chaupis et al., 2022). Varios estudios de investigación han reportado diferentes tipos de materiales de celulosa para la limpieza de derrames de petróleo. Se han desarrollado nuevos materiales con propiedades avanzadas en las que se han sintetizado y modificado nanocristales de celulosa para mejorar su capacidad de sorción de aceite. Estos nanocristales se pueden dispersar fácilmente en agua y han mostrado resultados prometedores en la absorción de aceite del agua contaminada (Diraki et al. 2019; Riaz, McKay y Saleem, 2017, p. 31). De manera similar, los aerogeles a base de celulosa también han demostrado una alta capacidad de sorción de aceite debido a su alta porosidad y estructura interconectada (Orjuela-Palacio y Zaritzky, 2023)

Además, los investigadores han explorado el uso de membranas a base de celulosa para la separación de agua y petróleo. Estas membranas están diseñadas con tamaños de poro específicos que permiten el paso del agua mientras atrapan y separan las gotas de aceite (Meza et al., 2022).

Los absorbentes de fibra naturales son materiales celulósicos que se utilizan para absorber y retener líquidos, entre ellos el petróleo. A diferencia de otros absorbentes, estos son biodegradables, sostenibles y con capacidades de absorción adecuadas, lo que los convierte en una opción efectiva para el tratamiento de derrames de petróleo.

Diversos estudios han explorado el uso de materiales celulósicos absorbentes en el tratamiento de derrames de petróleo. Sus investigaciones ofrecen un nuevo enfoque para abordar este problema a través de la utilización de materiales agrícolas disponibles localmente. Dawodu y Akpomie (2021) se centraron en el uso de cáscaras de coco como absorbentes de petróleo, demostrando que estos materiales, previamente considerados como residuos, pueden absorber de manera efectiva los hidrocarburos del petróleo derramado. Estos absorbentes de cáscara de coco proporcionan una solución sostenible, ya que no solo ayudan a limpiar el derrame, sino que también pueden convertirse en un producto útil después del proceso de absorción.

Por otro lado, Choi (2019) investigó el uso de paja de arroz como absorbente de petróleo. La paja de arroz es un subproducto agrícola abundante que posee una gran capacidad de absorción de hidrocarburos. Además, este absorbente es biodegradable, lo que significa que se descompone rápidamente y no causa daños a largo plazo en el medio ambiente. Doshi et al. (2018) llevaron a cabo un estudio para evaluar la eficiencia de diferentes absorbentes de fibra natural en el tratamiento de derrames de petróleo. Encontraron que los absorbentes a base de fibras de coco y celulosa tenían una alta capacidad de adsorción y eran capaces de retener el petróleo de manera eficiente. Estos absorbentes también demostraron ser sostenibles y económicos, lo que los hace una opción viable para ser utilizados a gran escala.

De manera similar, Songsaeng et al. (2019) investigaron el uso de absorbentes de fibra natural en el tratamiento de derrames de petróleo. Encontraron que las fibras de rayón y las fibras de coco tenían una alta afinidad por el petróleo y eran capaces de absorberlo rápidamente.

Además, estos absorbentes mostraron una excelente capacidad de retención, lo que facilitó su posterior eliminación de manera segura.

Otro estudio relevante en este campo fue realizado por Liu y Wang (2019). Investigaron la capacidad de absorción de diferentes absorbentes de fibra natural, incluyendo los derivados de la cáscara de arroz y las fibras de algodón. Los resultados mostraron que estos absorbentes tenían una alta capacidad de absorción y eran capaces de retener el petróleo de manera efectiva. Además, se destacó su facilidad de uso y su carácter sostenible.

Tang et al. (2018) llevaron a cabo un estudio para evaluar la efectividad de los absorbentes de fibra natural en condiciones de laboratorio y en el campo. Encontraron que estos absorbentes tenían una alta capacidad de absorción, incluso en condiciones adversas. Además, se demostró su capacidad para absorber no solo petróleo, sino también otros compuestos químicos presentes en los derrames, lo que los convierte en una opción versátil y efectiva.

Abdelwahab et al. (2017) realizaron un estudio para investigar la capacidad de absorción de una fibra natural derivada de la fibra de palma. Encontraron que este absorbente tenía una alta capacidad de absorción y era capaz de retener grandes cantidades de petróleo. Además, destacaron su carácter sostenible, ya que estaba hecho de un recurso renovable y biodegradable.

Por último, Dong et al. (2015) estudiaron la capacidad de absorción de diferentes absorbentes de fibra natural en una escala piloto. Encontraron que estos absorbentes tenían una alta eficiencia de absorción y eran capaces de retener grandes cantidades de petróleo. Estos resultados sugieren que estos absorbentes podrían ser utilizados a gran escala para el tratamiento de derrames de petróleo.

METODOLOGÍA

La descripción metodológica de este estudio se basa en un procedimiento experimental correlacional, que presenta primero un estudio de la producción agrícola en el estado de Veracruz, para la selección de los materiales que presentan mayor impacto, identificando qué materiales celulósicos de desecho, tienen mayor disponibilidad en la región centro de Veracruz, con un aprovechamiento potencial como material absorbente.

De acuerdo al Censo Agropecuario 2022 en el estado de Veracruz (INEGI, 2022), de la superficie con vocación agropecuaria y aprovechamiento forestal, 2,737,289 hectáreas se destinaron al uso agrícola.

Entre los productos agrícolas destaca la caña de azúcar con una producción de 21,227, 445 toneladas, seguido por cítricos como el limón y naranja que suman 2,655,017 toneladas, además del maíz en grano blanco, en grano amarillo y forrajero, que en conjunto suman 739,716 toneladas producidas. Adicionalmente, de la superficie con aprovechamiento agrícola, 1,673 hectáreas se destinaron para la producción forestal, con un total de 122,092 metros cúbicos de especies forestales maderables. De acuerdo al censo económico 2016 en Veracruz existen más de 2413 empresas que se dedican a la industria del mueble, y representan el 8.8% de la producción a nivel nacional (Balderas Pérez et al., 2019). De acuerdo a Solano-Benavides et al., (2022), el 28% de la materia prima utilizada en carpinterías es desperdiciada, formando residuos no utilizados. Finalmente, es importante señalar que el estado de Veracruz, específicamente en la zona centro-sur, pertenece a la región estratégica 4, dentro de las 16 regiones con potencial consideradas para producción de coco en México (SAGARPA, 2016). Apartir de esta información, es que se identifica al olote de maíz, la fibra de coco y el aserrín de madera como principales residuos agrícolas base celulosa, generados principalmente en la zona centro de Veracruz; en este sentido, la figura 1 muestra la forma típica en la que se generan estos residuos agrícolas.

Figura 1. Presentación típica de residuos agrícolas utilizados en este estudio: a) olote, b) fibra de coco, c) aserrín de madera



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se propone la generación de un diseño experimental para evaluar la absorción de materiales celulósicos, específicamente enfocado en un modelo factorial 3^3 . Para ello, es necesario identificar los factores y niveles correspondientes, así como definir la variable de respuesta objetivo, que en este caso es el porcentaje de hidrocarburo absorbido.

Un diseño experimental es una estrategia planificada que permite evaluar el efecto de diferentes variables independientes en una variable dependiente o de respuesta.

En este caso, se pretende conocer cómo diferentes factores afectan la absorción de materiales celulósicos. Los factores son las variables independientes que deseamos controlar y manipular en el experimento para observar sus efectos en la variable de respuesta. Para este diseño factorial 3^3 , se utilizan tres factores, cada uno con tres niveles posibles. Esto significa que se tendrá un total de 27 experimentos diferentes ($3 \times 3 \times 3$) para evaluar en este trabajo.

La identificación de los factores y niveles se realiza a partir de un análisis del problema y de conocimientos previos acerca del sistema en estudio. En este caso, los factores serán la densidad del hidrocarburo, el tamaño de las partículas del material celulósico y el tipo de material utilizado. Estos factores se establecen como variables independientes, y se varían en tres niveles, tamaño de partícula #16, #30 y #50.

La variable de respuesta objetivo es el porcentaje de hidrocarburo absorbido por los materiales celulósicos, se ocupan tres tipos hidrocarburos: aceite 37° API, 31° API y 23° API, emulando un derrame petrolero a condiciones controladas, como se observa en la figura 2.

Figura 2. Simulación de derrame de petróleo a condiciones controladas en laboratorio



Fuente: Elaboración propia

Se realiza la preparación de las muestras, una vez obtenido los materiales olote, aserrín y fibra de coco, para posteriormente pasar por un proceso de secado de los materiales, exponiéndolos a temperatura ambiente por un periodo de 4 horas diarias durante 10 días para eliminar los remanentes de agua en su interior y de esta manera obtener una mayor capacidad absorbente de cada material. Una vez transcurrido el tiempo de secado se procedió a moler cada material por separado con un molino de mano. Posteriormente se realizó un tamizado de las fibras naturales, mediante el cual se obtuvieron tres tamaños de partícula que se retienen en las mallas #16, #30 y #50, para cada tipo de material.

Una vez obtenidos los tamaños de partícula #16, #30 y #50, así como las cantidades necesarias de cada uno para llevar a cabo los experimentos, se generan las 27 corridas experimentales correspondientes, de acuerdo al diseño factorial 3^3 propuesto, donde las variables de entrada son:

- Tipo de material celulósico absorbente: olote, aserrín y coco
- Tamaño de partícula del material celulósico absorbente: < malla #16, < malla #30 y < malla #50.
- Tipo de aceite: 37 °API, 31 °API y 27 °API.

La tabla 1 muestra la distribución de las corridas experimentales propuestas.

Para el desarrollo de cada corrida experimental, se utiliza un vaso de precipitado de 100 ml, en el cual se agrega agua en una cantidad de 50 gramos (50 ml, tomando como referencia la densidad del agua igual a 1 gr/ml), seguido de una cantidad de 5 gramos de aceite (volumen variable de acuerdo al tipo de aceite utilizado en cada corrida experimental), generando un sistema de derrame de petróleo simulado, como se observa en la figura 3 para el caso de una muestra de hidrocarburo con densidad de 37 API.

Figura 3. Muestra de agua con hidrocarburo 37 °API



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se añade el material celulósico absorbente, manteniendo un control de la cantidad en gramos que se añade, hasta el punto en el que se alcanza la saturación de la absorción de hidrocarburo por el material celulósico utilizado, en el tamaño de partícula de acuerdo a la corrida experimental correspondiente.

Tabla 1. Corridas experimentales propuestas para el Diseño factorial 3³.

Corrida experimental	Tipo de aceite	Tipo de material	Tamaño de partícula
1	37 °API	Olote	Malla #16
2	37 °API	Olote	Malla #30
3	37 °API	Olote	Malla #50
4	37 °API	Aserrín	Malla #16
5	37 °API	Aserrín	Malla #30
6	37 °API	Aserrín	Malla #50
7	37 °API	Fibra de coco	Malla #16
8	37 °API	Fibra de coco	Malla #30
9	37 °API	Fibra de coco	Malla #50
10	31 °API	Olote	Malla #16
11	31 °API	Olote	Malla #30
12	31 °API	Olote	Malla #50
13	31 °API	Aserrín	Malla #16
14	31 °API	Aserrín	Malla #30
15	31 °API	Aserrín	Malla #50
16	31 °API	Fibra de coco	Malla #16
17	31 °API	Fibra de coco	Malla #30
18	31 °API	Fibra de coco	Malla #50
19	23 °API	Olote	Malla #16
20	23 °API	Olote	Malla #30
21	23 °API	Olote	Malla #50
22	23 °API	Aserrín	Malla #16
23	23 °API	Aserrín	Malla #30
24	23 °API	Aserrín	Malla #50
25	23 °API	Fibra de coco	Malla #16
26	23 °API	Fibra de coco	Malla #30
27	23 °API	Fibra de coco	Malla #50

Fuente: Elaboración propia

La figura 4 muestra la adición de partículas de olote, para absorción de hidrocarburo, hasta el punto de saturación (punto en el cual el olote deja de absorber hidrocarburo).

Para alcanzar el punto de saturación, fue requerido dejar un tiempo de contacto en el sistema hidrocarburo-agua-material absorbente, el cual varió de 1 a 3 minutos para todas las corridas experimentales realizadas, posterior a este tiempo de contacto se procedió a la extracción del

aglomerado que se generó de hidrocarburo-material absorbente con trazas de agua, se pudo observar que durante el tiempo de contacto que se dejó el material expuesto, además de absorber fluidos, la mezcla se compactó, lo cual ayudó a que el retiro de la mezcla hidrocarburo-material absorbente fuera más sencillo, la figura 5 muestra el aglomerado hidrocarburo-olote que fue retirado del sistema de derrame, como parte de la ejecución de la corrida experimental 1.

Figura 4. Mezcla de hidrocarburo-agua-olote



Fuente: Elaboración propia

Figura 5. Mezcla recuperada de hidrocarburo-agua-olote



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se pesó la mezcla recuperada, para determinar la cantidad de hidrocarburo y agua que ha sido absorbida por el material absorbente durante el tiempo que estuvo en contacto antes de ser retirada. La descripción anterior se repitió para todas las corridas experimentales descritas en la tabla 1, tomando en consideración el tipo de aceite crudo, el tipo de material absorbente y su tamaño de partícula correspondiente, de acuerdo a la descripción de cada corrida experimental. La figura 6 muestra un comparativo de la absorción de hidrocarburo por los tres materiales celulósicos absorbentes, con el mismo tamaño de partícula, para el mismo tipo de aceite crudo.

Figura 6. Comparativo de absorción de los tres materiales celulósicos absorbentes



Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de la ejecución de las 27 corridas experimentales que se realizaron, en atención al diseño experimental 3^3 , la tabla 2 muestra la recolección de los resultados obtenidos de la cantidad de gramos de material absorbente utilizado y la cantidad de hidrocarburo absorbido, como variables de respuesta, en cada uno de los experimentos que se llevaron a cabo.

Se realizó un análisis de varianza para determinar el efecto de los factores sobre la cantidad de gramos de material absorbente utilizado, y definir la configuración correspondiente, que presente la mejor absorción posible. Se analizan los datos y se determina el efecto de cada factor sobre la variable de respuesta tal y como se observa en la tabla 3. De acuerdo al análisis de varianza, en el tratamiento estadístico es posible observar un valor R^2 ajustada = 87.25 %, este valor indica que el modelo estadístico explica el comportamiento de absorción de los hidrocarburos, satisfactoriamente, con una varianza $S = 0.3333$.

La figura 7 muestra el diagrama de Pareto, de efectos estandarizados, donde se observa que el tamaño de partícula es el factor de mayor incidencia en el comportamiento de la capacidad de absorción, le sigue el tipo de material, la interacción entre el tamaño de partícula y tipo de material, como significativos en la absorción de hidrocarburos. Se observa que los efectos de la densidad API, la interacción entre tamaño-API y la interacción tipo-API, no presentan ningún efecto significativo sobre la absorción de hidrocarburos.

Adicionalmente las figuras 8, 9, 10 y 11 muestran el resultado de los gráficos de residuales.

Tabla 2. Material absorbente e hidrocarburo recuperados en gramos en el diseño experimental.

Corrida experimental	Mezcla recuperada	Material absorbente	Hidrocarburo absorbido	Agua
1	11	5	4	2
2	9	2	5	2
3	9	2	5	2
4	8	2	5	1
5	7	2	5	0
6	7	2	5	0
7	3	2	1	0
8	4	2	2	0
9	7	2	5	0
10	10	5	4	1
11	8	2	5	1
12	8	2	5	1
13	7	2	5	0
14	7	2	5	0
15	8	2	5	1
16	7	2	5	0
17	8	2	5	1
18	7	2	5	0
19	12	4	5	3
20	10	2	5	3
21	8	2	5	1
22	7	2	5	0
23	7	2	5	0
24	6	1	5	0
25	7	2	5	0
26	8	2	5	1
27	6	1	5	0

Fuente: Elaboración propia

La gráfica de probabilidad normal presenta una tendencia lineal ajustada por encima de la línea de referencia, lo que indica un comportamiento apropiado.

Las gráficas de valor ajustado y orden de observación de los residuales, presentan un comportamiento aleatorio, lo que refuerza la representatividad del diseño factorial propuesto, de acuerdo a las corridas experimentales generadas y analizadas estadísticamente.

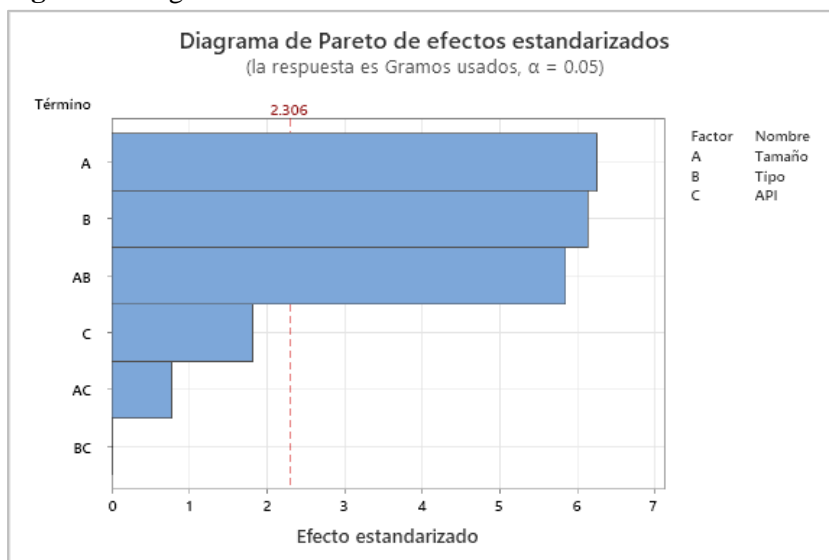
Tabla 3. Análisis de varianza del diseño experimental desarrollado.

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	18	21.7778	96.08%	21.7778	1.20988	10.89	0.001
Lineal	6	12.8889	56.86%	12.8889	2.14815	19.33	0.000
Tamaño	2	6.2222	27.45%	6.2222	3.11111	28.00	0.000
Tipo	2	6.0000	26.47%	6.0000	3.00000	27.00	0.000
API	2	0.6667	2.94%	0.6667	0.33333	3.00	0.107
Interacciones de 2 términos	12	8.8889	39.22%	8.8889	0.74074	6.67	0.006
Tamaño*Tipo	4	8.4444	37.25%	8.4444	2.11111	19.00	0.000
Tamaño*API	4	0.4444	1.96%	0.4444	0.11111	1.00	0.461
Tipo*API	4	0.0000	0.00%	0.0000	0.00000	0.00	1.000
Error	8	0.8889	3.92%	0.8889	0.11111		
Total	26	22.6667	100.00%				

Fuente: Elaboración propia

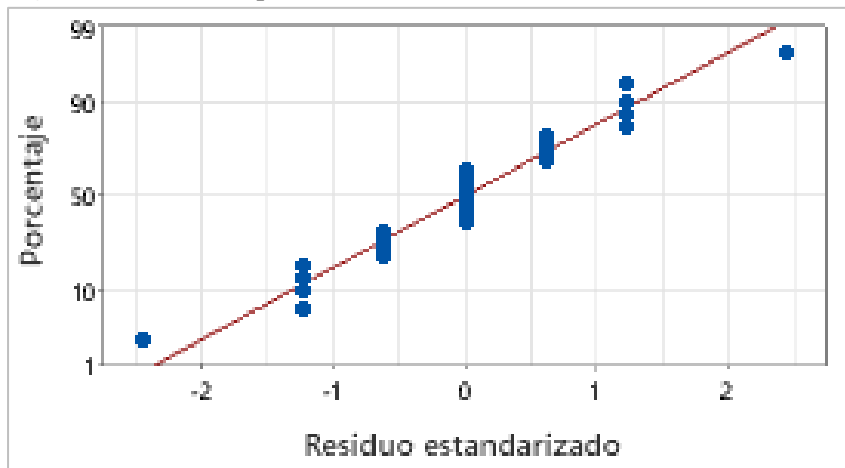
El gráfico del histograma presenta una tendencia similar a un comportamiento de distribución normal, apoyando así que el modelo estadístico es adecuado para describir la capacidad de absorción medida en las corridas experimentales realizadas.

Figura 7. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados



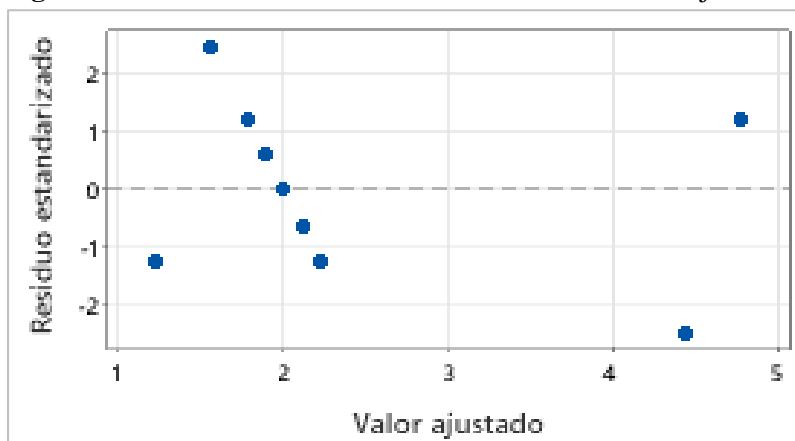
Fuente: Elaboración propia

Figura 8. Gráfica de probabilidad normal de residuales estandarizados



Fuente: Elaboración propia

Figura 9. Gráfica de residuales estandarizados de valores ajustados



Fuente: Elaboración propia

Figura 10. Gráfica de distribución normal de residuales estandarizados (Fuente: Elaboración propia).

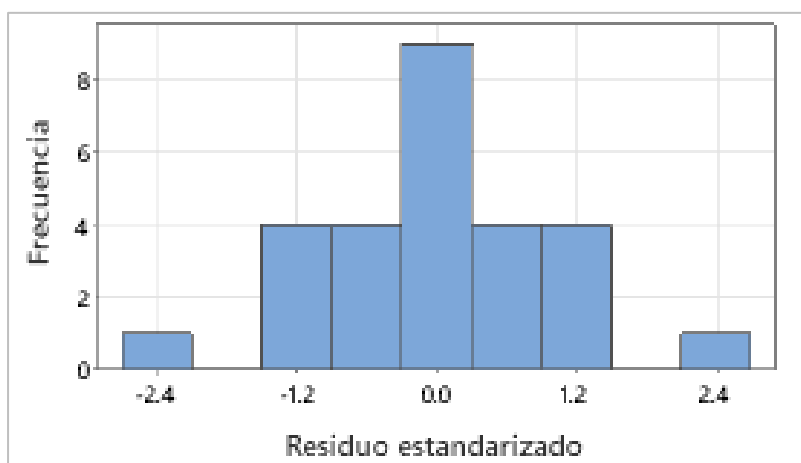
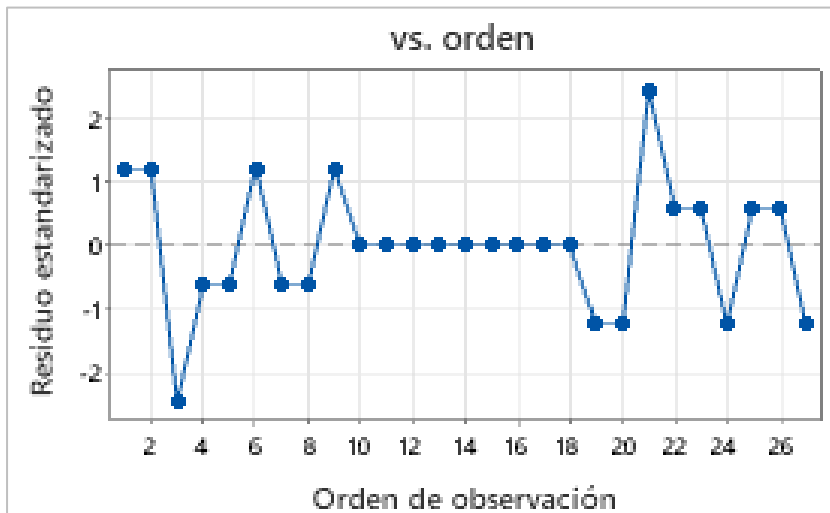


Figura 11. Gráfica de orden de observación vs residuales estandarizados

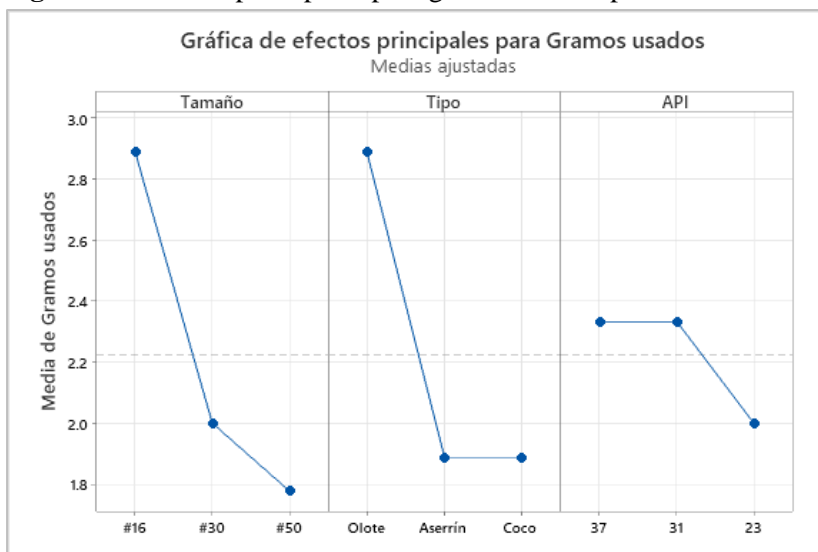


Fuente: Elaboración propia

Complementariamente, las figuras 12, 13, 14 y 15 muestran el comportamiento de las interacciones entre los factores de entrada respecto a la cantidad de material absorbente utilizado, en gramos, y con la cantidad de hidrocarburo absorbido, con el propósito de visualizar la interrelación existente entre cada uno de los factores que intervinieron en el análisis de cada una de las corridas experimentales.

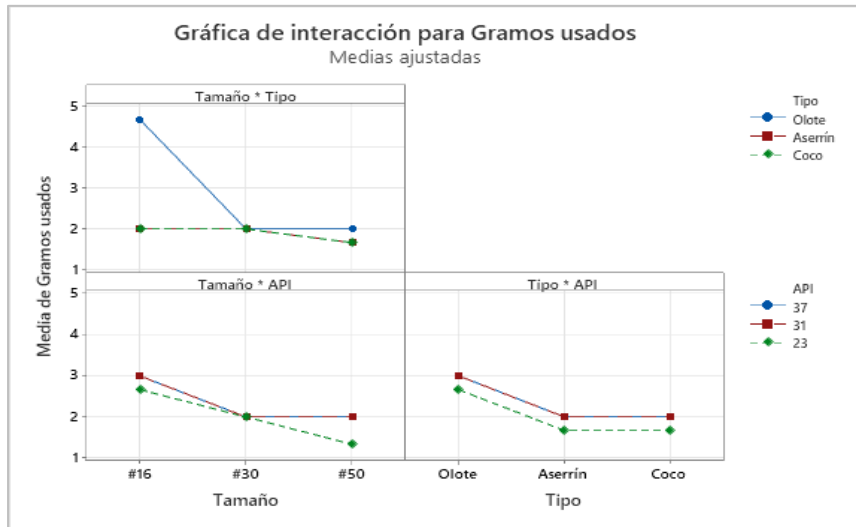
De igual forma, este análisis permite observar el comportamiento de los efectos no significativos de las características evaluadas, esto lleva a establecer un análisis de priorización en la selección de parámetros incidentes en el efecto de absorción de petróleo; la sustitución de estas características no significativas como la gravedad API, y su interacción con otros factores, puede tomar en cuenta otro efecto no considerado, como el tiempo de contacto entre el material absorbente y el petróleo.

Figura 12. Efectos principales para gramos usados para absorción de hidrocarburo



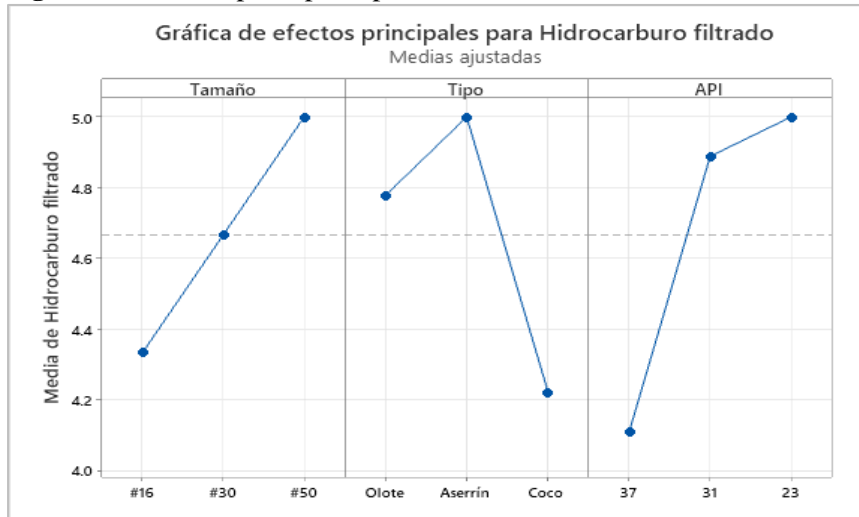
Fuente: Elaboración propia

Figura 13. Gráfica de interacción de gramos usados para absorción de hidrocarburo



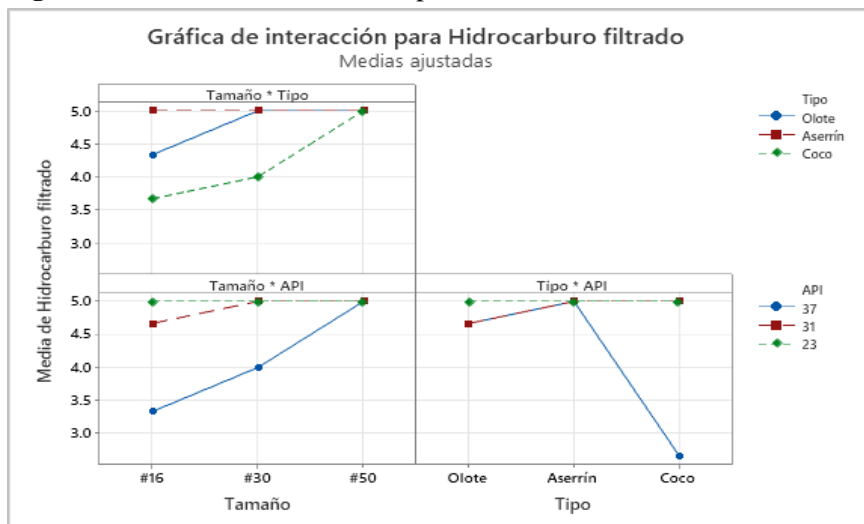
Fuente: Elaboración propia

Figura 14. Efectos principales para hidrocarburo filtrado con materiales celulósicos



Fuente: Elaboración propia

Figura 15. Gráfica de iteración de para hidrocarburo filtrado con materiales celulósicos



A partir de los resultados expuestos previamente, se puede determinar que, entre más grande sea el tamaño de partícula, es necesario una mayor cantidad de material absorbente para lograr una mayor retención de hidrocarburo, esto debido a que a mayor tamaño de partícula se tiene una menor área activa de contacto, mientras que al reducir el tamaño de partícula, el área activa de contacto del material celulósico se incrementa.

El aserrín de cedro y la fibra de coco, a diferencia del olote, requieren una menor cantidad de material, esto puede atribuirse a una mayor cantidad de celulosa contenida en la composición de estas fibras en comparación del olote; para ello es requerido realizar un estudio más profundo sobre la caracterización de residuos de contenido celulósico.

En función de la densidad del hidrocarburo, tanto para un aceite ligero (31 °API) y extra ligero (37 °API), se requiere una mayor cantidad de material, en comparación a uno de una densidad mediana (23 °API), esto debido a que la viscosidad del aceite es menor, lo cual permite que el hidrocarburo fluya con mayor facilidad entre los espacios disponibles entre los granos o partículas del material absorbente. El tamaño de partícula para el olote influye considerablemente en la cantidad de gramos a utilizar de material, esto debido a la combinación de la poca área activa que existe en un tamaño de partícula mayor y la cantidad de materia celulosa del olote, mientras que para el aserrín de cedro y la fibra de coco no se presentan variaciones significativas en la absorción de hidrocarburo debido a la variación del tamaño de estas.

La capacidad absorbente de hidrocarburos incrementa a menor tamaño de partícula, debido a que existe una mayor área de contacto activa en los materiales, permitiendo una mayor capacidad absorbente.

El aserrín de cedro es el material que presenta una mayor capacidad absorbente, siendo constante sin importar el tamaño de partícula, a comparación de olote y fibra de coco, los cuales su capacidad de absorción aumenta conforme se tenga un menor tamaño de partícula.

En función del tamaño de partícula y la densidad API del aceite, para un hidrocarburo mediano se tiene una alta capacidad de absorción sin importar el tamaño de partícula, mientras que un hidrocarburo ligero aumenta un poco al reducir el tamaño de partícula; en el caso de aceites extra ligeros, se observa un incremento en la absorción de hidrocarburo, ya que entre menor sea el tamaño de partícula la capacidad absorbente aumenta significativamente.

El aserrín de cedro es el que posee una mayor capacidad absorbente de hidrocarburos, sin importar la variación de su densidad, mientras que el olote presenta un comportamiento menor en su capacidad de absorción, mientras que es posible observar una gran disminución en la capacidad absorbente del coco en aceites de una densidad extra ligera.

CONCLUSIONES

De acuerdo al análisis anterior, es posible visualizar la viabilidad técnica en el aprovechamiento de residuos agroindustriales, de alto contenido celulósico, para su aplicación en la remoción de hidrocarburos presentes en derrames petroleros, generando un área de oportunidad para su reincorporación en la cadena de valor, generando un impacto positivo en el medio ambiente al reducir considerablemente las cantidades de residuos generados y enviados a disposición final o incineración de los mismos, generando gases contaminantes que se emiten a cielo abierto; y por otra parte, en su aplicación para la recuperación de hidrocarburos en derrames, que representan un problema ambiental significativamente complejo, por sus efectos negativos que presentan a cuerpos de agua y su biodiversidad. En este trabajo, se realizó un análisis comparativo del desempeño y eficacia de residuos agroindustriales de la industria del mueble y agrícolas como la generación de fibra de coco y olote de maíz, los cuales son de alta generación en la zona costera y centro de Veracruz. A partir del análisis realizado, se pudo evidenciar la capacidad absorbente de los tres tipos de materiales, resaltando la eficiencia del aserrín como absorbente, sin dejar de lado la posibilidad de aprovechamiento de los otros residuos agroindustriales, de acuerdo a las condiciones adecuadas para su aprovechamiento, como son su aplicación en tamaños de partícula adecuados, densidad del aceite que se requiere absorber, salinidad del agua, la temperatura y la interacción de estas condiciones.

Finalmente, es importante señalar la posibilidad de realizar más estudios que permitan caracterizar la composición de estas fibras, así como la modificación en su capacidad de absorción de hidrocarburos, al ser sometidas a un pretratamiento que lleve a un incremento en la exposición del contenido celulósico al retirar impurezas de las fibras como son resinas y aceites que limiten la efectividad de su área activa; además de realizar un estudio de escalamiento de las pruebas realizadas en laboratorio, para evaluar la eficiencia de absorción a nivel piloto, en sistemas de filtración y absorción de hidrocarburo, a condiciones controladas y a condiciones naturales de ocurrencia de este fenómeno.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abdelwahab, O., Nasr, S.M. y Thabet, W.M., 2017. Palm fibers and modified palm fibers adsorbents for different oils. *Alexandria Engineering Journal*, vol. 56, no. 4, pp. 749-755. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2016.11.020>.
- Alabresm, A., Chen, Y. P., Decho, A. W. y Lead, J. (2018). A novel method for the synergistic remediation of oil-water mixtures using nanoparticles and oil-degrading bacteria. *Science of the Total Environment*, 1292-1297 <https://doi:10.1016/j.scitotenv.2018.02.277>
- Badillo, F. M. C. (2023). El petróleo, un factor determinante en la historia de las relaciones exteriores mexicanas. Posición. *Revista del Instituto de Investigaciones Geográficas*, (9), 1-13.
- Balderas P., J. J., L. C. Sandoval H., G. E. Nani G., E. D. Portela y F. Sánchez G. 2019. Competitividad y sustentabilidad con un enfoque de calidad en el sector productor de muebles de la región de Misantla, Ver. In: García S., L. E. (Edit.). *Congreso Interdisciplinario de Ingenierías*. Instituto Tecnológico Superior de Misantla. Misantla, Ver., México. pp. 214-222. https://pmii.itsm.edu.mx/productividad/CII/memoriacii_2019.pdf. (01 de diciembre de 2024).
- Boran, M. (2017). Pollution of marine environment by ship. *Cercetari Marine*, 244-248.
- Chaupis Meza, D., Alvarado Huayhuaz, J., Arias Choque, T., & Valderrama Negrón, A., (2022). Validación técnica de una red de biomembranas para la limpieza y contingencia ante un derrame de petróleo en el mar. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5930956>
- Choi, H.J., 2019. Agricultural bio-waste for adsorptive removal of crude oil in aqueous solution. *Journal of Material Cycles and Waste Management* [en 46 línea], vol. 21, no. 2, pp. 356-364. <http://dx.doi.org/10.1007/s10163-018-0797-3>.
- Dawodu, F.A., Abonyi, C.J. y Akpomie, K.G., 2021. Feldspar-banana peel composite adsorbent for efficient crude oil removal from solution. *Applied Water Science* [en línea], vol. 11, no. 1, pp. 1-10. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01335-8>.
- Diraki, A., Mackey, H.R., McKay, G. y Abdala, A., 2019. Removal of emulsified and dissolved diesel oil from high salinity wastewater by adsorption onto graphene oxide. *Journal of Environmental Chemical Engineering* [en línea], vol. 7, no. 3, pp. 103106. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103106>



- Dong, T., Xu, G. y Wang, F., 2015. Oil spill cleanup by structured natural sorbents made from cattail fibers. *Industrial Crops and Products* [en línea], vol. 76, pp. 25-33. ISSN 09266690. DOI 10.1016/j.indcrop.2015.06.034. <http://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.06.034>
- Doshi, B., Sillanpää, M. y Kalliola, S., 2018. A review of bio-based materials for oil spill treatment. *Water Research*, vol. 135, pp. 262-277. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.02.034>.
- INEGI, 2022. Resultados Definitivos del Censo Agropecuario 2022 en el Estado de Veracruz. https://www.uv.mx/agronomia/files/2022/09/Comunicado-estatal-Ver_CA2022_697.pdf (01 de diciembre de 2024).
- Kleindienst, S., Paul, J. H. y Joye, S. B. (2015). Using dispersants after oil spills: Impacts on the composition and activity of microbial communities. *Nature Reviews Microbiology* 13, 388-396. <https://doi.org/10.1038/nrmicro3452>
- Li, M., Yin, X. y Li, J., 2019. Robust superhydrophobic/superoleophilic sponge for efficient removal of oils from corrosive aqueous solutions. *Journal of Adhesion Science and Technology* [en línea], vol. 33, no. 13, pp. 1426-1437. <https://doi.org/10.1080/01694243.2019.1599573>.
- Liu, J. y Wang, X., 2019. A new method to prepare oil adsorbent utilizing waste paper and its application for Oil Spill Clean-ups. *BioResources*, vol. 14, no. 2, pp. 3886-3898. <https://doi.org/10.15376/biores.14.2.3886-3898>.
- Medina-Moreno, S. A., Jiménez-González, A., Gutiérrez-Rojas, M. y Lizardi-Jiménez, M.A. (2014). Hexadecane aqueous emulsión characterization and uptake by an oildegrading microbial consortium. *International Biodeterioration and Biodegradation* 84, 1-7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.05.018>
- Meza, D. C., Huayhuaz, J. A., Choque, T. A., & Negrón, A. V. (2022). *Validación técnica de una red de biomembranas para la limpieza y contingencia ante un derrame de petróleo en el mar*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.5930956>
- Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) (2022)
- Solano-Benavides, E., Alandete-Brochero, N., Estrada-López, H., 2022. Residuos de Madera. Impacto social, económico y ambiental. Ediciones Universidad Simon Bolivar. <https://doi.org/10.17081/r.book.2023.02.11687>



- Orjuela-Palacio, J. M., & Zaritzky, N. E., (2023). Esponjas de queratina con capacidad de sorción de hidrocarburos, obtenidas a partir de residuos de la industria avícola: Esponjas de queratina con capacidad de sorción de hidrocarburos. *Ciencia Y Tecnología Agropecuaria*, 24(1). https://doi.org/10.21930/rcta.vol24_num1_art:2830
- Redonda-Deceano, César L., Arroyo-Acosta, David, Bueno-Tokunaga, Arturo, & Reyes-Gonzalez, David. (2022). Análisis de la capacidad absorbente del olote de maíz en derrames petroleros. *Ingeniería Industrial*, 43(3), 148-160.
- Riaz, M.A., Mckay, G. y Sallem, J., 2017. 3D graphene-based nanostructured materials as sorbents for cleaning oil spills and for the removal of dyes and miscellaneous pollutants present in water. *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 24, no. 36, pp. 27731-27745. <HTTPS://doi.org/10.1007/s11356-017-0606-x>.
- SAGARPA 2016. Planeación Agrícola Nacional 2017 – 2030. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257082/Potencial-Palma de Coco.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257082/Potencial-Palma_de_Coco.pdf) (01 de diciembre de 2024).
- Sardi, S.S., Qurban, M.A., Li, W., Kadinjappalli, K.P., Manikandan, P.K., Hariri, M.M., SENER | Sistema de Información Energética | Producción de petróleo crudo por entidad federativa. (2021). [Energia.gob.mx. https://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvequa=PMXB1C02](https://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvequa=PMXB1C02)
- Songsaeng, S., Thamyongkit, P. y Poompradub, S., 2019. Natural rubber/reduced-graphene oxide composite materials: Morphological and oil adsorption properties for treatment of oil spills. *Journal of Advanced Research*, vol. 20, pp. 79-89. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2019.05.007>
- Tang, M., Zhang, R. y Pu, Y., 2018. Wheat Straw Modified with Palmitic Acid as an Efficient Oil Spill Adsorbent. *Fibers and Polymers*, vol. 19, no. 5, pp. 949-955. <https://doi.org/10.1007/s12221-018-7733-y>.
- Tiselius, P. y Magnusson, K. (2017). Toxicity of treated bilge water: The need for revised regulatory control. *Marine Pollution Bulletin* 114, 860-866. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.010>
- Tormoehlen, L. M., Tekulve, K. J. y Nañagas, K.A. (2014). Hydrocarbon toxicity: A review. *Clinical Toxicology* 2, 479-489. <https://doi.org/10.3109/15563650.2014.923904>



Yáñez, P., & Bárcenas, M. (2012). Determinación de los niveles de tolerancia a hidrocarburos y potencial de fitorremediación de cuatro especies vegetales del sector Baeza-El Chaco, Ecuador. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 15(1), 30. <https://doi.org/10.17163/lgr.n15.2012.03>

