



S.E.P

S.E.S.

T.N.M.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AGUASCALIENTES
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERIA AMBIENTAL



“Obtención de un surfactante magnético soportado en materiales porosos para su uso en la eliminación de grasas y aceites presentes en cuerpos de agua”

Tesis para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias En Ingeniería Ambiental

Presenta:

Juan Fernando Panales Cortés

Directora de tesis:

Dra. Ma. Del Rosario Moreno Virgen

Co-Director de tesis:

Dr. Omar Francisco González Vázquez

Aguascalientes, Ags. enero del 2025.



Instituto Tecnológico de Aguascalientes
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Aguascalientes, Ags., 21 enero/2025

Oficio No. DEPI 020/2025

Asunto: Autorización impresión tesis

C. JUAN FERNANDO PANALES CORTÉS
PRESENTE

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado para Examen de Grado de Maestría, hacemos **constar** que, habiendo revisado el Trabajo de Tesis desarrollado por Usted, bajo el título: **"Obtención de un surfactante magnético soportado en materiales porosos para su uso en la eliminación de grasas y aceites presentes en cuerpos de agua"**, hemos dictaminado que éste es de aceptarse, por lo que se autoriza su impresión.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
Ingenio, Cultura y Saber, que conducen a la Excelencia®

PRESIDENTE

Ma. Rosario Moreno V.
DRA. MA. DEL ROSARIO MORENO VIRGEN

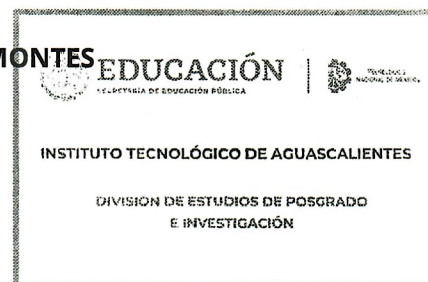
SECRETARIO

DR. OMAR FRANCISCO GONZÁLEZ VÁZQUEZ

VOCAL

DR. J. ASCENCIÓN GUERRERO VIRAMONTES

ccp. Archivo
JFLH/yevo



2025
Año de
**La Mujer
Indígena**

Av. Adolfo López Mateos #1801. Fracc. Bona Gens
C.P. 20256 Aguascalientes, Ags. Tel. 449 910 5002 ext. 127
e-mail: jefatura.depi@aguascalientes.tecnm.mx
tecnm.mx | www.aguascalientes.tecnm.mx





Instituto Tecnológico de Aguascalientes
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Aguascalientes, Ags., 21/enero/2025
Asunto: Autorización de uso de derechos

Juan Fernando Panales Cortés, mayor de edad, con domicilio ubicado en **Paseos de Asientos #323, Paseos de Aguascalientes, Jesús María, Aguascalientes C.P. 20907**, en mi calidad de titular y autor de la tesis denominada **"Obtención de un surfactante magnético soportado en materiales porosos para su uso en la eliminación de grasas y aceites presentes en cuerpos de agua"** quien para todos los fines del presente documento se denominará **EL AUTOR Y/O TITULAR**, suscribo el presente documento de autorización de uso de derechos patrimoniales de autor a favor del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes el cual se regirá por las cláusulas siguientes:

PRIMERA – AUTORIZACIÓN: **EL AUTOR Y/O TITULAR**, mediante el presente documento autoriza la utilización de los derechos patrimoniales de autor al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes, de la tesis denominada **"MÁQUINA DE APRENDIZAJE EN PARALELO PARA OPTIMIZAR EL TIEMPO DE PROCESAMIENTO EN LA DETENCIÓN DE PATRONES RELACIONADOS CON EL SUICIDIO EN REDES SOCIALES"**, a través del Repositorio Institucional del Tecnológico Nacional de México (en lo sucesivo TecNM) y en el Repositorio Nacional, que puede ser consultado en la liga electrónica: (www.repositorionacionalcti.mx/).

SEGUNDA – OBJETO: Por medio del presente escrito, **EL AUTOR Y/O TITULAR** autoriza al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes, a través del Repositorio Institucional del TecNM y en el Repositorio Nacional para que de conformidad con la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, use los derechos del documento antes referido, con fines exclusivamente académicos.

TERCERA – TERRITORIO: Los derechos aquí autorizados se dan sin limitación geográfica o territorial alguna.

CUARTA – ALCANCE: La presente autorización se da tanto para formato o soporte material, y se extiende a la utilización en medio óptico, magnético, electrónico, en red, mensajes de datos o similar conocido o por conocer, del ejemplar o número respectivo de la publicación.

QUINTA – EXCLUSIVIDAD: La autorización de uso aquí establecida no implica exclusividad en favor del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes. Por lo tanto, **EL AUTOR Y/O TITULAR** en su carácter de autor de la obra objeto del presente documento se reserva el derecho de publicar directamente, u otorgar a cualquier tercero, autorizaciones de uso similares o en los mismos términos aquí acordados.



Av. Adolfo López Mateos #1801. Fracc. Bona Gens
C.P. 20256 Aguascalientes, Ags. Tel. 449 910 5002 ext. 127
e-mail: jefatura.depi@aguascalientes.tecnm.mx
tecnm.mx | www.aguascalientes.tecnm.mx





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Aguascalientes
División de Estudios de Posgrado e Investigación

SEXTA – DERECHOS MORALES (Créditos y mención): La Autorización de los derechos antes mencionados no implica la cesión de los derechos morales sobre los mismos por cuanto en conformidad con lo establecido en los artículos 18, 19, 20, 21, 22 y 23 de la Ley Federal de Derechos de Autor, dada la cuenta que estos derechos son inalienables, imprescriptibles, irrenunciables e inembargables. Por lo tanto, los mencionados derechos seguirán radicados en cabeza de EL AUTOR Y/O TITULAR, y siempre deberá mencionarse su nombre cuando se utilice la obra.

SÉPTIMA – AUTORÍA: EL AUTOR Y/O TITULAR, declara y ratifica que el material objeto de la presente fue realizada por él o por ella sin violar o usurpar derechos de Propiedad Intelectual de terceros.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

Ingenio, Cultura y Saber, que conducen a la Excelencia

Ing. Juan Fernando Panales Cortés
AUTOR DE LA TESIS

Vo.Bo.

Ma. Rosario Moreno V.

Dra. Ma. del Rosario Moreno Virgen
DIRECTOR DE LA TESIS

ccp. Archivo



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Adolfo López Mateos #1801. Fracc. Bona Gens
C.P. 20256 Aguascalientes, Ags. Tel. 449 910 5002 ext. 127
e-mail: jefatura.depi@aguascalientes.tecnm.mx
tecnm.mx | www.aguascalientes.tecnm.mx





Agradecimientos

A Dios, cuya sabiduría y guía han sido esenciales en cada etapa. Su presencia me brindó claridad en momentos de incertidumbre y fortaleza para enfrentar los desafíos que surgieron. A mi familia, quienes han sido un pilar incondicional en mi vida. A mi papá, Alberto Panales, por su constante apoyo y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia. A mi mamá, Edith Cortés, por su amor incondicional y por ser mi mayor inspiración en cada paso que he dado.

A mi hermano, Alberto Panales Cortés, por su aliento y compañía en los momentos difíciles. Sin su apoyo y motivación, este logro no habría sido posible.

Al Instituto Tecnológico de Aguascalientes por brindarme la oportunidad de cursar mis estudios de maestría en una institución de alto nivel académico, el cual entorno de aprendizaje fue esencial para el desarrollo de este trabajo.

A la Dra. Ma. Rosario Moreno Virgen, por su guía, paciencia y apoyo incondicional, así como por sus valiosas aportaciones. Gracias por su dedicación y motivación en todo momento.

Al Dr. Omar Francisco González Vázquez, por su contribución en este trabajo y por compartir su vasta experiencia.

Al Dr. J. Ascensión Guerrero Viramontes, por la orientación y disposición que me otorgó durante este periodo de tiempo.

A mis maestros, que han sido esenciales para la culminación de este proyecto.

Al CONACyT por el respaldo financiero otorgado durante mi maestría, el cual resultó indispensable para el desarrollo de este trabajo académico.



Resumen

La contaminación de cuerpos de agua con grasas y aceites representa un grave problema ambiental, dado que estos residuos forman una capa en la superficie que bloquea el paso de oxígeno al agua, indispensable para la vida acuática. La reducción de oxígeno provoca la muerte de organismos, alternando el equilibrio del ecosistema. Además, al descomponerse, estas sustancias generan gases tóxicos que producen una “niebla tóxica”, perjudicial tanto para el entorno acuático como para la salud de las comunidades cercanas.

Los aceites y las grasas también pueden ser perjudiciales para la salud humana, puesto que pueden causar irritación en la piel, problemas respiratorios y cáncer. Se están implementando medidas para evitar su vertido y extraerlos de los cuerpos de agua, sin embargo, la remoción de estos agentes contaminantes es un desafío debido a que son sustancias insolubles en agua, lo que significa que no se mezclan ni se disuelven al entrar en contacto con ella, en lugar de dispersarse, flotan en la superficie formando una capa que impide la circulación de gases, complicando su eliminación con métodos de limpieza convencionales, como lo son las trampas de grasa, la implementación de coagulantes y floculantes, los separadores de aceite y agua, y la evaporación.

El desarrollo de materiales que puedan adsorber selectivamente grasas y aceites del agua es de gran interés. En este marco, los surfactantes magnéticos han surgido como una alternativa prometedora. Estos materiales presentan una fácil implementación, pueden ser reutilizables, no generan subproductos contaminantes, y no son tóxicos. Además, no requieren de un equipo específico para su uso, solo un campo magnético externo. Estos beneficios hacen que estos materiales junto con el método de adsorción sean una opción viable y sostenible para la remoción de grasas y aceites de los cuerpos de agua.

Se sintetizaron tres tipos de surfactantes magnéticos utilizando diferentes relaciones molares y cantidades de precursores, con el objetivo de optimizar su capacidad de absorción y magnetización. La finalidad era desarrollar un surfactante que cumpliera con ambas propiedades. Para las pruebas de laboratorio, se emplearon aceite vegetal y aceite automotriz (nuevo y usado) con el fin de evaluar la capacidad de remoción de los surfactantes en soluciones acuosas.



Los resultados mostraron una remoción significativa de hasta el 30%, junto con una recuperación casi total del surfactante magnético al aplicar un campo magnético externo.

Se llevaron a cabo diversas técnicas de caracterización para identificar las propiedades del material sintetizado. Estas incluyeron espectroscopías FT-IR y Raman, utilizadas para analizar las vibraciones moleculares y los enlaces químicos; difracción de rayos X (XRD), empleada para determinar la estructura cristalina del material; análisis por plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), aplicado para cuantificar los elementos presentes; microscopía electrónica de barrido (SEM), utilizada para observar la morfología y composición superficial del material y un magnetómetro de muestra vibrante (VSM), que permitió determinar la naturaleza magnética del surfactante.



Índice

<i>Capítulo 1: Introducción</i>	8
1.1 Antecedentes.....	10
1.2 Planteamiento del problema	14
1.3 Justificación	15
1.4 Objetivos.....	16
1.4.1 General.....	16
1.4.2 Específicos.....	16
<i>Capítulo 2: Marco teórico</i>	17
2.1 Contaminación de cuerpos de agua por grasas y aceites	17
2.1.1.1 Tipos de grasas y aceites	18
2.1.1.2 Propiedades físicas y químicas de las grasas y aceites	19
2.1.2 Impacto ambiental de las grasas y aceites	19
2.1.3 Impacto en la salud humana	20
2.2 Métodos de remoción de grasas y aceites ya existentes	20
2.2.1 Trampas de grasa	20
2.2.2 Separación por gravedad	21
2.2.3 Tratamiento químico.....	21
2.2.4 Tratamiento biológico.....	22
2.2.5 Filtración por membrana	22
2.3 Surfactantes	23
2.3.1 Estructura molecular y comportamiento.....	23
2.3.2 Clasificación de surfactantes	24
2.3.3 Aplicación de surfactantes para remoción de grasas y aceites del agua.....	25
2.3.3.1 Adsorción.....	25
2.4 Fundamentos de magnetismo	26
2.4.1 Materiales y nanomateriales magnéticos	27
2.4.1.1 Cloruro ferroso tetahidratado ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$).....	30
2.4.1.2 Cloruro ferroso hexahidratado.....	30
2.4.1.3 Hidróxido de sodio	30
2.4.2 Ferrofluidos	31
2.5 Materiales porosos.....	31



2.5.1 Propiedades.....	32
2.5.2 Clasificación	32
2.5.2.1 Carbón de hulla bituminosa.....	33
2.6 Surfactantes magnéticos	34
2.6.1 Definición	34
2.6.2 Características de los surfactantes magnéticos	35
2.6.3 Mecanismo de remoción.....	35
2.6.4 Adsorbentes tradicionales vs surfactantes magnéticos	35
2.7 Caracterización fisicoquímica y magnética de los surfactantes magnéticos	36
2.7.1 Espectroscopía infrarroja (FT-IR)	36
2.7.2 Espectroscopía Raman.....	37
2.7.3 Microscopía electrónica de barrido SEM	37
2.7.4 Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS)	38
2.7.5 Difracción de rayos X.....	38
2.7.6 Magnetómetro de muestra vibrante (VSM).....	39
<i>Capítulo 3: Metodología</i>	41
3.1 Primer etapa: Síntesis del surfactante magnético	41
3.1.1 Experimentos preliminares	41
3.1.2 Experimentos óptimos	41
3.2 Segunda etapa: Caracterización fisicoquímica y magnética del S.M.S.....	44
3.2.2 Espectroscopía Raman.....	45
3.2.3 Microscopia electrónica de Barrido SEM	45
3.2.4 Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS)	45
3.2.5 Difracción de rayos X.....	46
3.3 Tercer etapa: Estudios de adsorción de aceites	46
<i>Capítulo 4: Resultados</i>	49
4.1 Primer etapa: Síntesis del surfactante magnético	49
4.1.1 Experimentos preliminares	49
4.1.2 Experimentos óptimos	50
4.2 Segunda etapa: Caracterización fisicoquímica y magnética del S.M.S.....	52
4.2.1 Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)	52
4.2.2 Espectroscopia Raman.....	54
4.2.3 Espectroscopia de difracción de rayos X.....	55
4.2.4 Microscopia electrónica de barrido SEM	56



4.2.5 Espectroscopia de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS).....	57
4.2.6 Curva B-H del S.M.S.....	58
4.3 Tercer etapa: Estudios de adsorción de aceites	59
4.3.1 Experimentos preliminares	59
4.3.2 Experimentos finales	60
Capítulo 6: Referencias bibliográficas.....	69

Tabla de figuras

Figura 1. Tipos de surfactantes.....	24
Figura 2. Componentes del fenómeno de adsorción.....	26
Figura 3. Comportamiento de los materiales magnéticos.....	28
Figura 4. Carbón de hulla bituminosa triturado en malla de 120 μm	34
Figura 5. Comportamiento de nanopartículas con incidencia de un campo magnético.	34
Figura 6. Balanza para la medición de susceptibilidad magnética.	43
Figura 7 . (a) Experimento para medición de su susceptibilidad magnética, (b) Comportamiento del S.M.S. ante la presencia de un campo magnético externo.	50
Figura 8. Señal/ruido de los parámetros y niveles de la síntesis de S.M.S.....	51
Figura 9. Espectro FT-IR para el surfactante vs S.M.S vs carbón de hulla bituminosa.	53
Figura 10. Espectro Raman para S.M.S.....	55
Figura 11. Difractograma de rayos X para el S.M.S.	56
Figura 12. Imágenes SEM del S.M.S. sintetizado.....	57
Figura 13. Curva B-H del S.M.S.	59
Figura 14. Señal/ruido de los parámetros y niveles de remoción del S.M.S. para el aceite vegetal nuevo	62
Figura 15. Señal/ruido de los parámetros y niveles de remoción del S.M.S. para el aceite vegetal usado	63
Figura 16. Señal/ruido de los parámetros y niveles de remoción del S.M.S. para el aceite de auto nuevo	65
Figura 17. Señal/ruido de los parámetros y niveles de remoción del S.M.S. para el aceite de auto usado	66



Capítulo 1: Introducción

El agua es un elemento natural esencial para el desarrollo de la vida y las actividades humanas. Este recurso es utilizado para satisfacer necesidades, por ejemplo, en la agricultura, la industria, el transporte, la generación de energía, el consumo doméstico, entre otros. Debido a todas estas actividades, se ha incrementado la contaminación del agua en los últimos años, lo que ha provocado alteraciones en sus propiedades físicas, químicas y organolépticas.

Físicamente, el agua se vuelve más turbia y oscura por la acumulación de sedimentos. Con respecto a la química, se ven afectados el pH y el oxígeno disuelto, volviéndose el agua más ácida y menos habitable para la fauna acuática. En cuanto a las propiedades organolépticas, el agua adquiere olores desagradables, como el sulfuro, y un sabor metálico por los metales pesados, volviéndola insegura tanto para el consumo humano como para el ecosistema. Esto ha llevado a una disminución en la calidad y cantidad de agua, lo que genera problemas graves tanto en el ámbito ambiental como en la salud humana [1], [2]

A pesar de que cerca de dos tercios de la superficie de la Tierra están cubiertos de agua, solo el 3% de esta es agua dulce disponible para el consumo humano. Esta limitación, con el tiempo, ha impulsado la necesidad de buscar alternativas para el tratamiento de este recurso. Los contaminantes son agentes físicos, biológicos o químicos que causan cambios en las fuentes de agua. Estas fuentes de contaminación se dividen en dos tipos: fuentes directas e indirectas. Las fuentes directas son aquellas que liberan contaminantes en forma de efluentes, como industrias, hogares y plantas de tratamiento. Por otro lado, las fuentes indirectas son aquellas en las que los contaminantes entran en contacto con el agua a través de procesos como la *lixiviación*, cuando el agua de lluvia disuelve contaminantes del suelo y los lleva a aguas subterráneas; *el arrastre*, cuando el agua superficial recoge sustancias, como fertilizantes y pesticidas, y las transporta a ríos y lagos y la *dilución*, que implica la dispersión de contaminantes en un cuerpo de agua, lo que reduce su concentración, pero extiende su presencia en el entorno.



Las grasas y aceites se consideran una fuente directa de contaminación, y se presentan desafíos en el proceso de eliminación de estos contaminantes de los efluentes, ya que interfieren con los tratamientos de aguas residuales debido a sus propiedades físicas [3], [4] Aunque existen métodos mecánicos para la eliminación de grasas y aceites, estos requieren un alto consumo de energía, insumos y costos operativos elevados, lo que a largo plazo podría resultar poco rentable. Por esta razón, el desarrollo de alternativas para la eliminación de estos contaminantes en las aguas residuales es un campo que merece mayor atención en la actualidad.

Una alternativa prometedora para la remoción de grasas y aceites en aguas residuales es el uso de un surfactante magnético, que facilita la eliminación de estos contaminantes mediante la aplicación de un campo magnético. Sin embargo, la investigación en este ámbito es aún limitada. Este proyecto presenta una solución integral para la eliminación de aceites y grasas disueltos, abarcando desde la síntesis del surfactante magnético hasta las pruebas de adsorción pertinentes.



1.1 Antecedentes

La contaminación del agua es un problema que ha venido incrementando en los últimos años, gracias a que las actividades antropogénicas generan residuos que se vierten en los cuerpos de agua, volviéndolos peligrosos para el medio ambiente y salud pública. Específicamente, los residuos en fase líquida suelen ser muy difíciles y costosos de remover. Las grasas y aceites son residuos que cuentan con estas características. El vertido de estos desechos en cuerpos de agua tiene consecuencias graves para el entorno acuático. Estos contaminantes forman una capa superficial que obstruye la entrada de luz solar, afectando negativamente la fotosíntesis de las plantas acuáticas y reduciendo el nivel de oxígeno disuelto en el agua.[1], [5], [6]

Existen diferentes métodos para la remoción de grasas y aceites en cuerpos de agua, los cuales se clasifican en métodos mecánicos, fisicoquímicos e híbridos.

Los *métodos mecánicos* se basan en la separación física entre los residuos y el agua mediante procesos de filtración, sedimentación o centrifugación. Estos métodos aprovechan las diferencias de densidad y tamaño de las partículas para lograr su separación. Los *métodos fisicoquímicos* combinan procesos físicos y químicos para la remoción de grasas y aceites. Algunas técnicas comunes incluyen la coagulación-floculación, donde se agregan coagulantes para formar flóculos que atrapan las partículas de grasa, y la adsorción, que utiliza materiales porosos o carbón activado para atrapar y retener las grasas y aceites. Por último, los métodos híbridos son una combinación de técnicas mecánicas y fisicoquímicas. Por ejemplo, se pueden utilizar membranas filtrantes junto con procesos de coagulación-floculación para lograr una mayor eficiencia en la remoción de estos residuos contaminantes. A la fecha, ya se han desarrollado diversos proyectos que tienen como finalidad remover grasas y aceites de cuerpos de agua en donde se han utilizado diferentes métodos de remoción. Por ejemplo, en la industria automotriz se generan graves cantidades de residuos de aceites vertidos en desagües, por ello, en este sector se han hecho numerosos estudios para para desarrollar métodos eficientes de remoción de aceites presentes en agua. Entre ellos destacan 3 métodos: El primer método consistió en uso de goma arábiga, que es un polisacárido natural que se obtiene de la resina de los árboles del género *Acacia*. El segundo se realizó con cabello natural y artificial, y el tercero con resina epoxi, un polímero

termoestable que se solidifica al combinarse con un agente catalizador o endurecedor, lo que provocó diversas complicaciones al momento de manipularlo[7]. Estos métodos fueron prácticos, económicos y eficientes los cuales permitieron la remoción de grasas y aceites de hasta más del 90 %.[3], [8], [9], [10]

Por otro lado, la remoción de aceites y grasas en aguas residuales de origen industrial se realizó utilizando un prototipo de trampa aceite-grasa basado en flotación-filtración, con una eficiencia del 20%, sin embargo, el prototipo no tuvo la eficiencia esperada debido a que el sistema presentaba inconsistencias como obstrucción de sólidos en la tubería. Por el contrario, las organoarcillas, materiales con alta superficie específica y una gran capacidad de adsorción y de bajo coste, fueron un material idóneo para realizar transferencia de materia que actúan en la interacción solido-líquido, por lo que fueron utilizadas en la remoción de aceites en una refinería [11]

Respecto al tratamiento de aguas residuales domésticas, se ha identificado la necesidad de abordar la eliminación de grasas y aceites como una prioridad debido a su contribución al deterioro de los cuerpos de agua. Una técnica destacada, el Sistema Unitario de Tratamiento de Aguas, Nutrientes y Energía (SUTRANE), utiliza un enfoque integral que separa aguas grises y negras, promoviendo procesos biodegradativos específicos. La trampa de grasas, componente clave del sistema, captura aceites flotantes y partículas lipídicas antes de su ingreso a los biodigestores. Estos biodigestores, contruidos con ferrocemento, permiten una biodegradación anaeróbica eficiente de los residuos. Adicionalmente, el sistema incorpora filtros biofísicos compuestos por capas de materiales como piedra bola, gravilla, grava y arena, sobre los cuales se establece una cubierta vegetal que actúa como un biofiltro para la absorción y transformación de contaminantes. En un estudio reportado por E. Díaz Cuenca et al., realizado en San Miguel Almaya, esta técnica ha demostrado ser particularmente efectiva, logrando minimizar la eutrofización de la laguna local, al reducir significativamente el aporte de nutrientes provenientes de descargas domésticas no tratadas. Además, el diseño del SUTRANE permite el reúso del agua tratada para riego, reforzando la sostenibilidad ambiental y económica de las comunidades rurales. [12]

Por otra parte, están los surfactantes, que son moléculas anfipáticas esenciales en diversas aplicaciones, incluyendo la remediación ambiental y la purificación de agua. Su estructura dual, con una parte hidrofílica y otra hidrofóbica, les permite disminuir la tensión superficial

e interfacial, favoreciendo procesos como la emulsificación y solubilización de contaminantes. Estos compuestos pueden clasificarse según su naturaleza iónica en aniónicos, catiónicos, no iónicos y anfotéricos. Los surfactantes aniónicos, como el dodecibenceno sulfonato de sodio (SDBS), son eficaces para formar micelas en concentraciones elevadas, mientras que los catiónicos tienden a interactuar con superficies cargadas negativamente, lo que los hace útiles en aplicaciones específicas de limpieza o desinfección. Los no iónicos, como el Triton X-100, destacan por su afinidad con materia orgánica, siendo empleados en sistemas más complejos para minimizar problemas de precipitación. Además, los biosurfactantes, una subcategoría obtenida de fuentes biológicas, ofrecen ventajas en términos de biodegradabilidad y menor toxicidad ambiental.

Estudios reportados por Muherei y Junin en 2009 muestran que las mezclas de surfactantes no iónicos y aniónicos pueden reducir pérdidas por adsorción y mejorar la remoción de hidrocarburos. Demostraron que las mezclas de dodecibenceno sulfonato de sodio (SDBS) con Triton X-100 presentan una reducción significativa de la adsorción en suelos y un aumento de la solubilidad del contaminante fenantreno, mejorando la eficiencia del proceso en hasta un 60%. De manera similar, Yang et. al en 2005 encontraron que la combinación de estos surfactantes genera sinergias que disminuyen la concentración micelar crítica (CMC) y aumentan la capacidad de solubilización de hidrocarburos, superando los resultados obtenidos con surfactantes individuales. [13]

Estos hallazgos destacan el potencial de las mezclas de surfactantes para optimizar procesos de remediación ambiental, aportando una solución eficiente y sostenible en la eliminación de contaminantes orgánicos.

Existen otros métodos de remoción no convencionales, como el uso de campos magnéticos. El magnetismo es un fenómeno físico en el cual los campos magnéticos ejercen atracción o repulsión con otros materiales. En un proyecto de investigación reportado por O. F. González Vázquez et al. en el año 2020, se utilizaron nanopartículas de magnetita para remover considerables cantidades de cobre presentes en el agua. Estas nanopartículas de magnetita fueron sintetizadas siguiendo el método de coprecipitación química. Se realizaron ensayos de adsorción de cromo presente en aguas residuales, tanto domésticas como industriales, las cuales se vierten sin ningún tratamiento en el drenaje, convirtiéndose en graves problemas medioambientales [14], [15]



En el año 2022, en un estudio reportado por la Dra. María Guadalupe Pérez García en la Universidad de Guadalajara, se desarrolló un surfactante magnético que presentó propiedades magnéticas gracias al uso de sales de hierro soportadas en un material poroso para la remoción de agentes contaminantes en cuerpos de agua.

Con base en las investigaciones previas y reportes en la literatura, este proyecto se centrará en el desarrollo de un surfactante magnético con características mejoradas. Se optimizará su susceptibilidad magnética para permitir una manipulación eficiente mediante campos magnéticos y facilitar su recuperación y reutilización. Además, el diseño incluirá un soporte poroso con alta superficie específica, maximizando la interacción sólido-líquido y mejorando la remoción de grasas y aceites presentes en cuerpos de agua contaminados. Este enfoque no solo incrementará la eficiencia del proceso, sino que también reducirá su impacto ambiental, proporcionando una solución innovadora y sostenible a un problema ambiental crítico.



1.2 Planteamiento del problema

La contaminación del agua conduce a importantes repercusiones tanto en el ámbito ambiental, como en la salud pública. La presencia de sustancias contaminantes en el agua, como productos químicos industriales, residuos agrícolas y desechos domésticos, tiene un impacto negativo en los cuerpos de agua y en su calidad. Estas sustancias pueden alterar el equilibrio del ecosistema, afectando la flora y la fauna. Además, la contaminación del agua puede tener graves consecuencias para la salud humana. El consumo de agua contaminada puede causar enfermedades gastrointestinales, infecciones bacterianas, enfermedades transmitidas por el agua y otros problemas de salud. Por lo tanto, es fundamental implementar medidas eficaces de tratamiento y purificación del agua, así como promover prácticas sostenibles que prevengan la contaminación y protejan la salud pública [14], [16], [17], [18]

La presencia de grasas y aceites en los cuerpos de agua es un grave problema de contaminación cuando estas se descomponen debido a que liberan nutrientes, como nitrógeno y fósforo. Estos nutrientes pueden promover el crecimiento excesivo de algas, lo que provoca la eutrofización del cuerpo de agua presentándose, por lo tanto, una disminución de oxígeno en el agua y de la entrada de luz solar. Por ello, se investigará el desarrollo de un surfactante magnético, que reduce la tensión superficial de los fluidos gracias a su composición, puesto que poseen una estructura única con una cabeza polar y una cola no polar, esta dualidad les permite interactuar con diferentes tipos de moléculas. La cabeza polar es hidrofílica, lo que significa que tiene afinidad por el agua, mientras que la cola no polar es hidrofóbica y se siente atraída por el aceite. Cuando se añade un surfactante a una mezcla de agua y aceite, las cabezas polares se orientan hacia el agua, mientras que las colas no polares se insertan en la fase oleosa. Esta acción reduce la tensión superficial entre el agua y el aceite, permitiendo que se mezclen temporalmente y facilitando de esta manera su separación [19], [20]

Considerando lo anterior, el objetivo de este proyecto de investigación es obtener un surfactante con propiedades magnéticas que, siendo soportado por un material poroso, sea capaz de remover grasas y aceites presentes en solución acuosa.

1.3 Justificación

La contaminación del agua a causa de los aceites y grasas es un problema que se presenta día con día, derivado de procesos industriales o como subproductos resultantes de algún proceso productivo e inclusive en los hogares donde se generan residuos de grasas y aceites y se vierten directamente en la tubería del desagüe.

Por lo tanto, es necesario desarrollar una nueva tecnología eficaz en la remoción de aceites y grasas, con un costo de aplicación menor en comparación a los métodos.

La implementación de un surfactante magnético para la remoción de grasas y aceites en cuerpos de agua es una técnica no convencional, que pretende ser eficiente y sustentable, debido a que no se emplean agentes contaminantes y equipos costosos, no se generan efectos secundarios al aplicar un campo magnético, por lo que la contaminación generada a través de un surfactante magnético puede ser nula en comparación a cualquier otro método de separación. El uso del campo magnético es seguro y no causa daños perjudiciales. Además, resulta altamente eficaz, ya que los surfactantes magnéticos permiten una eliminación de grasas y aceites que se pretende sea más efectiva. Este método también es respetuoso con el medio ambiente, ya que los surfactantes magnéticos pueden ser recuperados y reutilizados de manera sencilla. Por último, destaca por su rentabilidad, dado que los surfactantes magnéticos pueden ser utilizados de forma repetida, lo que reduce costos y aumenta la eficiencia del proceso. [14], [15], [21], [22], [23]

La adsorción es una técnica altamente eficaz para la remoción de grasas y aceites en cuerpos de agua debido a su capacidad para capturar compuestos lipofílicos a través de interacciones físicas y químicas en la superficie del material adsorbente. Este proceso es eficiente, económico y respetuoso con el medio ambiente, ya que no genera subproductos tóxicos y requiere un bajo consumo energético en comparación con métodos convencionales como la filtración o la coagulación-floculación. Además, la adsorción es adaptable a diversas condiciones operativas y escalas, lo que la convierte en una buena alternativa para el tratamiento de aguas residuales, tanto en aplicaciones industriales como domésticas, por lo que la adsorción como método, es fundamental para este proyecto, puesto que ofrece una solución efectiva y sostenible para abordar la contaminación por aceites y grasas en cuerpos de agua. [24]



1.4 Objetivos

1.4.1 General

Sintetizar y evaluar un surfactante magnético soportado en materiales porosos para su uso en la remoción de grasas y aceites presentes en el agua.

1.4.2 Específicos

- Sintetizar un surfactante magnético a base de sales de hierro soportado en un material poroso con alta respuesta magnética.
- Caracterizar el surfactante magnético con espectroscopia Infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR), espectroscopia Raman, espectroscopia electrónica de barrido (SEM), espectroscopia de energía dispersiva (EDS) y difracción de rayos X (XRD).
- Determinar la capacidad de remoción de grasas y aceites disueltos en agua del surfactante magnético obtenido.

Capítulo 2: Marco teórico

2.1 Contaminación de cuerpos de agua por grasas y aceites

Los cuerpos de agua enfrentan un serio problema de contaminación que tiene consecuencias negativas en la vida acuática y afecta su uso habitual. Entre los diferentes tipos de contaminantes presentes en el agua, uno de los más problemáticos de eliminar son las grasas y aceites, debido a su composición química. Estas sustancias se presentan en estado líquido y no se mezclan directamente con el agua. Con el objetivo de abordar este desafío, se propone utilizar un surfactante magnético soportado por materiales porosos para la remoción de grasas y aceites presentes en el agua. Este enfoque combina las propiedades de los surfactantes, que pueden separar una molécula de agua polar de otra molécula de aceite o grasa no polar mediante su cabeza polar y no polar, respectivamente. Además, los materiales porosos tienen la capacidad de adsorber y retener estas sustancias. Al utilizar un surfactante magnético en este enfoque, se facilitará la recuperación del agua contaminada, lo que permitirá un proceso de limpieza más eficiente y sostenible. Este enfoque innovador tiene el potencial de contribuir significativamente a la mejora de la calidad del agua y a su preservación [11], [19], [25], [26], [27]

La presencia de grasas y aceites en cuerpos de agua afecta ríos, lagos, mares y océanos. Estos contaminantes se generan principalmente a partir de actividades humanas e industriales. Las grasas y aceites se vuelven un problema cuando ingresan al agua en graves cantidades, que ocurre debido a descargas inapropiadas de aguas residuales industriales o domésticas sin el tratamiento adecuado. Los alimentos grasosos, las grasas de cocina y los productos derivados del petróleo son algunas de las fuentes principales de contaminación.

2.1.1 Grasas y aceites

Las FOG (por sus siglas en inglés, Fat, Oil y Grase) están compuestas por triglicéridos, que son ésteres formados por la reacción de un alcohol (glicerina) con ácidos grasos, esto incluye grasas animales como el tocino y aceites vegetales como el aceite de oliva.

La acumulación de grasas y aceites en tuberías puede resultar en vertidos de aguas residuales, lo que representa un problema significativo para el medio ambiente y la infraestructura urbana. Además, estas sustancias pueden recubrir la superficie del agua, dificultando la respiración de los peces y otras especies acuáticas. También existe el riesgo de que se descompongan en contaminantes nocivos que pueden contaminar el agua potable y causar enfermedades en las personas que la consumen.[8], [11], [20], [28]

Existen diversas medidas que se pueden considerar para prevenir la contaminación por FOG. Lo más importante es no tirarlas nunca por el desagüe. En su lugar, debe eliminarse adecuadamente llevándolo a un centro de recogida de residuos peligrosos. También hay una serie de productos disponibles que se pueden utilizar para atraparlas antes de que entren en el sistema de alcantarillado.

Si se derrama FOG, es importante limpiarlo inmediatamente. El aceite de cocina debe ser desechado en un recipiente hermético en los residuos domésticos, mientras que el aceite de motor usado en vehículos debe ser reciclado. También es recomendable utilizar limpiadores y detergentes no tóxicos para reducir la contaminación.

2.1.1.1 Tipos de grasas y aceites

Los triglicéridos representan la principal clase de componentes en las grasas y aceites naturales, y se dividen en simples y mixtos de acuerdo con su estructura. Un triglicérido simple contiene tres cadenas de ácidos grasos iguales, mientras que los triglicéridos mixtos presentan cadenas de ácidos grasos diferentes. Cuando un triglicérido posee dos o más tipos de ácidos grasos, puede existir en varias formas isoméricas, dependiendo de cómo están organizados estos ácidos en la molécula. En la naturaleza, las grasas suelen ser mezclas de triglicéridos mixtos, ya que este tipo es el más común.

Desde una perspectiva química, existen diferentes categorías de aceites. Los aceites minerales, derivados del petróleo, están formados por mezclas complejas de varios compuestos. Los aceites vegetales, por otro lado, se extraen de la pulpa de frutas, plantas y semillas, y suelen ser mayormente insaturados, lo que les otorga propiedades saludables. También están los aceites esenciales, que son combinaciones de compuestos volátiles obtenidos de plantas y que se distinguen por su volatilidad y aroma característico,

diferenciándose de los aceites grasos. Los aceites de origen animal, como la manteca, se obtienen de depósitos grasos en algunos animales. [29]

2.1.1.2 Propiedades físicas y químicas de las grasas y aceites

Las grasas y aceites se caracterizan por su insolubilidad en agua y su capacidad para disolverse en la mayoría de los disolventes orgánicos no polares. Tienen una textura oleosa de menor densidad que el agua y pueden sufrir saponificación en presencia de álcalis. Como la mayoría de estos lípidos están formados por triglicéridos, poseen varias propiedades importantes. La viscosidad, por ejemplo, mide la resistencia al flujo y es alta en grasas y aceites, lo cual influye en su desempeño en diversas aplicaciones. La densidad también es una propiedad clave, que puede variar en función del peso molecular, el grado de insaturación y la temperatura; esto implica que diferentes tipos de grasas y aceites presenten densidades variadas, afectando su uso en formulaciones específicas. Además, estos lípidos tienen una baja tensión superficial debido a la presencia de componentes polares en su superficie activa, lo que permite interacciones particulares con otros líquidos. Por último, la solubilidad está determinada por las propiedades termodinámicas del soluto y del disolvente, así como por las fuerzas de atracción molecular; esta propiedad es fundamental para comprender el comportamiento de grasas y aceites en diversas formulaciones químicas e industrias. [30]

2.1.2 Impacto ambiental de las grasas y aceites

Una vez que los aceites y las grasas llegan al agua es seguro que habrá un efecto negativo. En primer lugar, pueden formar una capa en la superficie del agua, impidiendo la oxigenación adecuada y reduciendo la luz solar que llega a las plantas acuáticas. Además, las grasas y aceites pueden contener sustancias tóxicas, como metales pesados o productos químicos, que se disuelven en el agua y amenazan la salud de los organismos que viven ahí, y, en última instancia, la salud humana si se consumen peces o mariscos contaminados.

La eliminación inadecuada de grasas y aceites en el agua también puede obstruir las tuberías y sistemas de alcantarillado, lo que provoca costosos daños y dificultades en el tratamiento de aguas residuales.[11], [31], [32], [33]

2.1.3 Impacto en la salud humana

La contaminación de cuerpos de agua con grasas y aceites constituye una seria amenaza a la salud pública. El contacto directo con estas sustancias puede causar problemas respiratorios, de la piel e incluso aumentar el riesgo de ciertos tipos de cáncer. En muchas partes del mundo, un porcentaje significativo de la población consume alimentos que han tenido contacto con aguas residuales sin tratar, debido a la falta de acceso a servicios adecuados de saneamiento. Esta exposición incrementa la incidencia de enfermedades transmitidas por el agua, contribuyendo a un alto número de muertes anuales. En América Latina, las enfermedades diarreicas agudas son una de las principales causas de mortalidad, con la mala gestión de aguas residuales como factor importante. [34]

Aunque muchas comunidades tienen acceso a agua para consumo directo, la contaminación de aguas usadas en el riego con grasas y aceites plantea riesgos de salud, ya que estos cultivos son consumidos directamente por humanos o indirectamente a través de animales que luego ingresan a la cadena alimentaria. Incluso pequeñas cantidades de aceites mal gestionados pueden deteriorar la calidad del agua y contribuir a un ciclo continuo de enfermedades. Estos factores subrayan la urgencia de implementar prácticas efectivas para el manejo y disposición de grasas y aceites, con el fin de proteger tanto la salud humana como el ambiente.

2.2 Métodos de remoción de grasas y aceites ya existentes

Existen varios métodos para separar aceites y grasas del agua, entre ellos destacan los mencionados a continuación:

2.2.1 Trampas de grasa

Las trampas de grasa, comúnmente usadas en América latina, son dispositivos fabricados en metal, plástico o concreto que se emplean en restaurantes, hoteles, comedores y viviendas para retener grasas, aceites y desechos orgánicos, evitando su paso al sistema de alcantarillado. Su función principal es interceptar estos residuos antes de que se enfríen y adhieran a las paredes internas de las tuberías, lo cual reduciría el flujo y podría provocar obstrucciones. Para su eficacia, deben instalarse de manera estratégica entre las áreas de

limpieza de alimentos y la conexión al sistema de desagüe, con fácil acceso para su mantenimiento.

El fundamento de este método se basa en la diferencia de densidades entre el agua y los aceites, lo que permite que estos últimos floten y queden retenidos en el dispositivo, evitando que ingresen a las aguas residuales. El proceso implica una tubería de admisión que lleva los residuos desde fregaderos, lavabos y lavaplatos, un área interna para sedimentación, donde los restos de alimentos se depositan al asentarse, y un sistema de separación, a menudo compuesto de placas o tubos, que atrapan las grasas y aceites para impedir su paso al sistema de descarga. La eficacia de las trampas de grasa depende en gran medida de su correcta instalación, un diseño apropiado y un mantenimiento constante. [35]

2.2.2 Separación por gravedad

El método más sencillo y común es la separación por gravedad, que consiste en dejar que el aceite y la grasa floten en la parte superior del agua, donde pueden retirarse con una espumadera. Este método, que se ha vuelto cada vez más obsoleto, sin embargo, se sigue utilizando en plantas de tratamiento antiguas o en aquellas con recursos económicos limitados. Aunque es un enfoque sencillo y de bajo costo, requiere instalaciones con un área y volumen adecuados para que el proceso se lleve a cabo correctamente. Además, es crucial que su manejo y gestión sean meticulosos para garantizar beneficios relativamente positivos. [36]

2.2.3 Tratamiento químico

Otro método es el tratamiento químico, que utiliza productos químicos como el alumbre, el cloruro férrico y el hidróxido de sodio para descomponer el aceite y la grasa en partículas más pequeñas que puedan eliminarse más fácilmente. En el tratamiento contemporáneo de aguas, la coagulación y floculación son procesos fundamentales para mejorar la calidad del agua al eliminar sólidos suspendidos. La coagulación se inicia al añadir un coagulante a la suspensión, lo que provoca una reacción física y química que desestabiliza las partículas coloidales, resultando en la formación de flóculos insolubles. Este proceso es crucial para superar los factores que mantienen la estabilidad del sistema. Además, es común incorporar polímeros junto con los coagulantes para potenciar la creación de flóculos más graves.

Posteriormente, en el proceso de floculación, estas partículas desestabilizadas se agrupan, facilitando su separación mediante sedimentación o filtración. Para optimizar estos procesos, se realizan pruebas de jarra que permiten evaluar diferentes dosis de coagulantes y condiciones de mezcla. Aunque la coagulación y floculación son métodos altamente efectivos, su correcta implementación requiere un manejo cuidadoso y sistemas adecuados para maximizar los beneficios en el tratamiento del agua. [36]

2.2.4 Tratamiento biológico

Se basa en la capacidad natural de las bacterias para reciclar elementos esenciales, como el carbono, nitrógeno y fósforo, esenciales para el equilibrio ambiental. El proceso para el éxito de este método lleva más tiempo que cualquier otro, sin embargo, es el más amigable con el medio ambiente. En las plantas de tratamiento, se emplean bacterias presentes en el medio ambiente, como las de suelos y cuerpos acuáticos, seleccionadas por su habilidad para descomponer materia orgánica y otros contaminantes. Mediante el diseño adecuado del sistema, se crean las condiciones óptimas para la bioconversión, como una aireación eficiente que proporciona oxígeno para bacterias aeróbicas y una cantidad equilibrada de biomasa.

El desarrollo de procesos biológicos incluye la creación de nichos ecológicos específicos que favorecen la adaptación de microorganismos a las condiciones del entorno. Para ello, se diseñan reactores biológicos que imitan hábitats naturales y aplican presiones selectivas, como el suministro de donadores de electrones (materia orgánica) que actúan como fuente de energía, aceptores de electrones (oxígeno o nitrato) para completar el metabolismo, y nutrientes esenciales (como fósforo y potasio) para el crecimiento celular. Factores como el pH, la temperatura y la dinámica del flujo también son cruciales, deben mantenerse en niveles adecuados para maximizar la actividad microbiana y asegurar una distribución uniforme de nutrientes y oxígeno. [37]

2.2.5 Filtración por membrana

La filtración por membrana es un método muy eficaz, pero puede resultar costoso. Emplea sistemas de membranas en múltiples etapas para separar contaminantes y generar un producto final purificado, mientras concentra sólidos suspendidos, coloides, metales y sales disueltas.

La selección del tipo de membrana depende del tamaño de las partículas o iones que se desea eliminar, adaptándose a las necesidades específicas del proceso.

Por ejemplo, la microfiltración, para partículas más graves como sólidos suspendidos; la ultrafiltración, que retiene coloides y proteínas; la nanofiltración, utilizada para eliminar moléculas orgánicas pequeñas y divalentes; la ósmosis inversa, que remueve prácticamente todos los iones y sales disueltas; y sistemas de electrodiálisis (EDI), especializados en purificación y desmineralización de agua para aplicaciones altamente específicas. Esta técnica es ampliamente utilizada en aplicaciones industriales y ambientales para el tratamiento y recuperación de agua contaminada. [10], [19], [23], [38]

2.3 Surfactantes

Un tensioactivo o surfactante, es una molécula que tiene propiedades tanto hidrófilas como hidrófobas, que les permite actuar como emulsionantes, humectantes, detergentes, espumantes y dispersantes. Los tensioactivos se utilizan en una amplia variedad de productos, entre los que se incluyen: detergentes, jabones líquidos, suavizantes, pinturas, cosméticos, productos de cuidado personal, aditivos alimentarios y productos industriales. Los tensioactivos disminuyen la tensión superficial del agua, lo que permite que el agua moje las superficies más fácilmente y elimine la suciedad, el aceite y otras sustancias con mayor eficacia. Los tensioactivos también se utilizan para crear espumas, cuya estructura está formada por burbujas de aire rodeadas por una película de tensioactivo que ayudan a estabilizar la espuma y evitan que se deshaga. [13], [10], [23], [39]

2.3.1 Estructura molecular y comportamiento

Los surfactantes magnéticos tienen una cabeza hidrófila y una cola hidrófoba (Figura 1). Estos compuestos suelen estar formados por una larga cadena de hidrocarburos con un grupo de cabeza polar. La cadena de hidrocarburos es hidrófoba, mientras que el grupo de cabeza polar es hidrófilo. Los surfactantes tienen actividad superficial, lo que significa que disminuyen la tensión superficial del agua. Además, presentan emulsificación, humectación, detergentencia, formación de espuma y solubilización. Los surfactantes pueden utilizarse para crear emulsiones, que son mezclas de dos líquidos inmiscibles, como el aceite y el agua.

También pueden ayudar a que el agua moje las superficies más fácilmente y eliminar la suciedad, el aceite y otras sustancias de las superficies.[19], [20], [40], [41]

2.3.2 Clasificación de surfactantes

Los surfactantes se dividen en cuatro tipos principales: aniónicos, catiónicos, no iónicos y anfóteros, dependiendo de la carga en su grupo de cabeza (Figura 1). Los surfactantes aniónicos poseen un grupo de cabeza con carga negativa, mientras que los catiónicos presentan una carga positiva en su grupo de cabeza. Por otro lado, los surfactantes no iónicos carecen de carga neta en su estructura, lo que les permite ser altamente estables en un rango amplio de pH y temperaturas, siendo ideales para aplicaciones donde se requiere minimizar interacciones electrostáticas. Finalmente, los surfactantes anfóteros poseen tanto cargas positivas como negativas en su grupo de cabeza, dependiendo del pH del medio. Esta versatilidad les permite adaptarse a diferentes condiciones y ofrecer propiedades duales, como estabilidad y compatibilidad con otros surfactantes. Estas características diversas hacen que cada tipo de surfactante interactúe de manera única con distintas sustancias, ampliando su rango de aplicaciones en industrias como la cosmética, farmacéutica y en la remoción de contaminantes como grasas y aceites en cuerpos de agua. [19], [20], [40], [41]

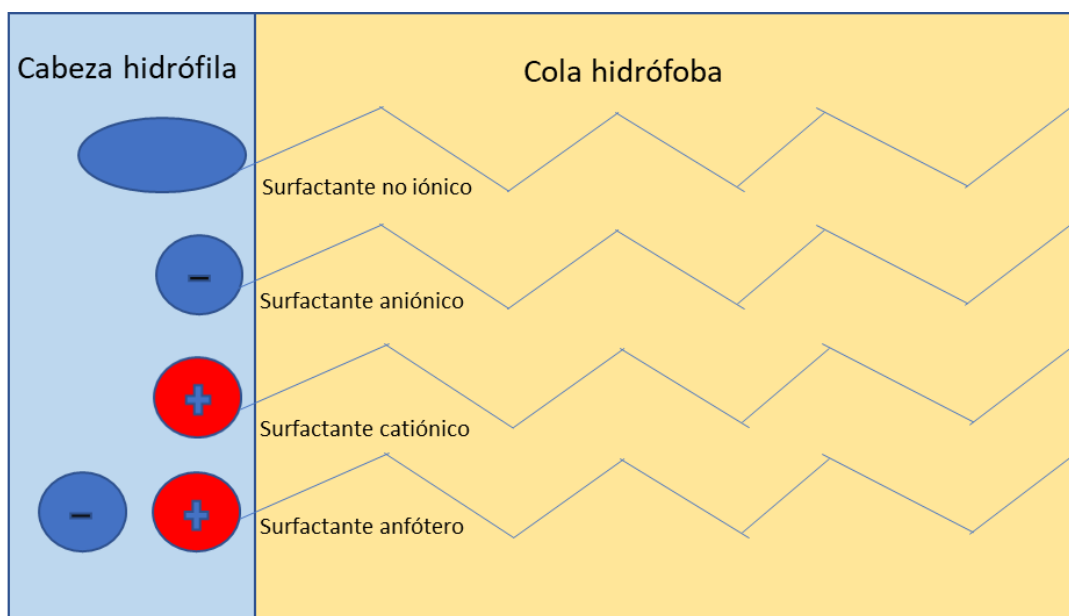


Figura 1. Tipos de surfactantes

2.3.3 Aplicación de surfactantes para remoción de grasas y aceites del agua

La aplicación de surfactantes para la remoción de grasas y aceites en el agua es una técnica eficaz que aprovecha la capacidad de estas moléculas para reducir la tensión superficial y estabilizar emulsiones.

2.3.3.1 Adsorción

El método de adsorción para separar grasas y aceites en sistemas acuosos es un proceso en el que las moléculas de una sustancia (el adsorbato) se adhieren a la superficie de otra sustancia (el adsorbente). En el caso de las grasas y los aceites en el agua, el adsorbente suele ser un material sólido con una superficie elevada, como el carbón activado, la arcilla o el silicio.

Las moléculas de grasas y aceites son atraídas a la superficie del adsorbente por fuerzas de Van der Waals. Estas fuerzas son débiles, pero lo suficientemente fuertes como para mantener las moléculas de grasas y aceites en su lugar. A medida que se adsorben más y más moléculas de grasas y aceites, forman una fina capa en la superficie del adsorbente. Esta capa puede eliminarse fácilmente del agua.[1], [42]

Es un proceso relativamente económico y sencillo. La adsorción puede utilizarse para tratar una gran variedad de corrientes de aguas residuales, como aguas residuales industriales, aguas pluviales y aguas residuales domésticas.

En cuanto a los adsorbentes empleados, el carbón activado es muy eficaz, pero puede resultar costoso. La arcilla es un adsorbente menos costoso, pero no es tan eficaz como el carbón activado. Por otro lado, el silicio es un adsorbente relativamente nuevo, pero promete ser una alternativa rentable al carbón activado.

La eficacia de la adsorción para eliminar grasas y aceites del agua depende de varios factores, como el tipo de adsorbente, la concentración de grasas y aceites y la temperatura. En general, la adsorción es más eficaz para eliminar concentraciones más bajas de grasas y aceites a temperaturas más altas. En la Figura 2 se muestra cómo interactúan las moléculas en presencia de un adsorbente las cuales se adhieren directamente.[15], [43]

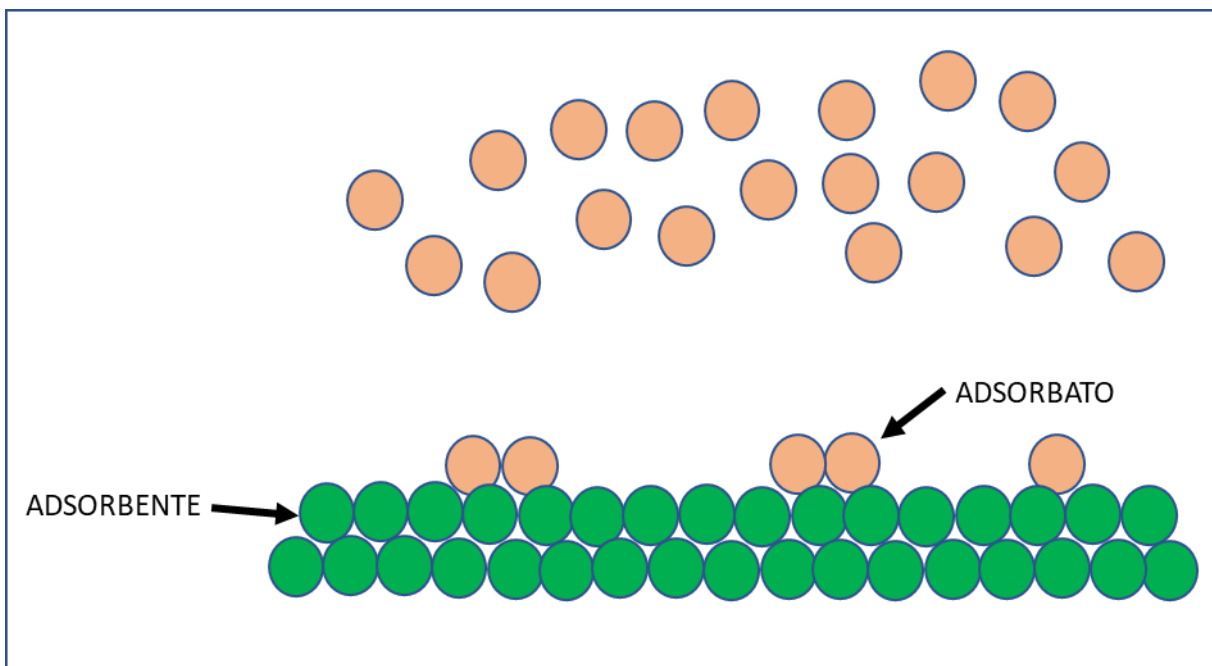


Figura 2. Componentes del fenómeno de adsorción.

2.4 Fundamentos de magnetismo

El magnetismo es una rama de la física que estudia las interacciones de los imanes y los campos magnéticos que producen, así como el comportamiento de distintos materiales que se encuentran bajo la influencia de dicho campo. Este fenómeno es relevante para el desarrollo de tecnologías de purificación de agua, como la eliminación de grasas y aceites mediante surfactantes magnéticos. Un imán consta de tres elementos clave. En primer lugar, están los polos, que son las zonas en los extremos del imán donde las fuerzas de atracción o repulsión son más intensas. Estos polos se identifican como norte (N) y sur (S), también conocidos como positivo y negativo, y presentan una interacción única: polos iguales se repelen (N-N, S-S), mientras que polos opuestos se atraen (N-S, S-N).

Otro componente fundamental es el eje magnético, una línea imaginaria que conecta ambos polos del imán y que define la dirección del campo magnético. Finalmente, se encuentra la línea neutra, un concepto que describe la zona entre los dos polos donde las fuerzas opuestas se equilibran. Estos principios de magnetismo permiten diseñar sistemas que, al combinar

surfactantes con materiales magnéticos y porosos, facilitan la adsorción y separación de contaminantes oleosos en cuerpos de agua mediante la manipulación magnética. [44]

2.4.1 Materiales y nanomateriales magnéticos

Los materiales magnéticos, esenciales en aplicaciones de separación y purificación, tienen propiedades que permiten la manipulación de partículas bajo un campo magnético, que se debe a la presencia de electrones no apareados en los átomos del material, lo cual es útil en sistemas de tratamiento de agua. [45]

Cuando se aplica un campo magnético externo, estos electrones no apareados se alinean en la dirección del campo, creando un momento magnético. Cuando se retira el campo externo, los momentos magnéticos permanecen alineados, dando al material su campo magnético permanente.

Existen tipos diferentes de materiales magnéticos, cada uno con propiedades específicas. Algunos de los tipos más comunes de materiales magnéticos son:

1. Ferromagnéticos: son el tipo más común, con fuertes propiedades magnéticas. Algunos ejemplos de materiales ferromagnéticos son el hierro, el níquel y el cobalto.
2. Paramagnéticos: son materiales débilmente magnéticos, con capacidad de magnetizarse en presencia de un campo magnético externo, aunque pierden su magnetismo cuando se retira el campo externo. Algunos ejemplos de materiales paramagnéticos son el oxígeno, el nitrógeno y el aluminio.
3. Diamagnéticos: son materiales repelidos por un campo magnético que se caracterizan por su capacidad de inducir un campo magnético en la dirección opuesta a un campo magnético externo. Algunos ejemplos de materiales diamagnéticos son el agua, el bismuto y el cobre.[46], [47], [48]

Las propiedades magnéticas de un material vienen determinadas por el número de electrones no apareados en los átomos del material. Los electrones no apareados son electrones que no

se han emparejado con otro electrón. Cuando se aplica un campo magnético externo, los electrones no apareados se alinean en la dirección del campo, creando un momento magnético.

La fuerza de un material magnético viene determinada por su permeabilidad magnética, que es una medida de la facilidad con la que un material puede ser magnetizado. La permeabilidad magnética en el material presenta su propio ordenamiento (Figura 3), los órdenes magnéticos se alinean o desalinean en dependencia del tipo de material, de esta manera se puede determinar qué tipo de material magnético es y cómo es su interacción con un flujo de campo magnético externo. [17], [49], [50]

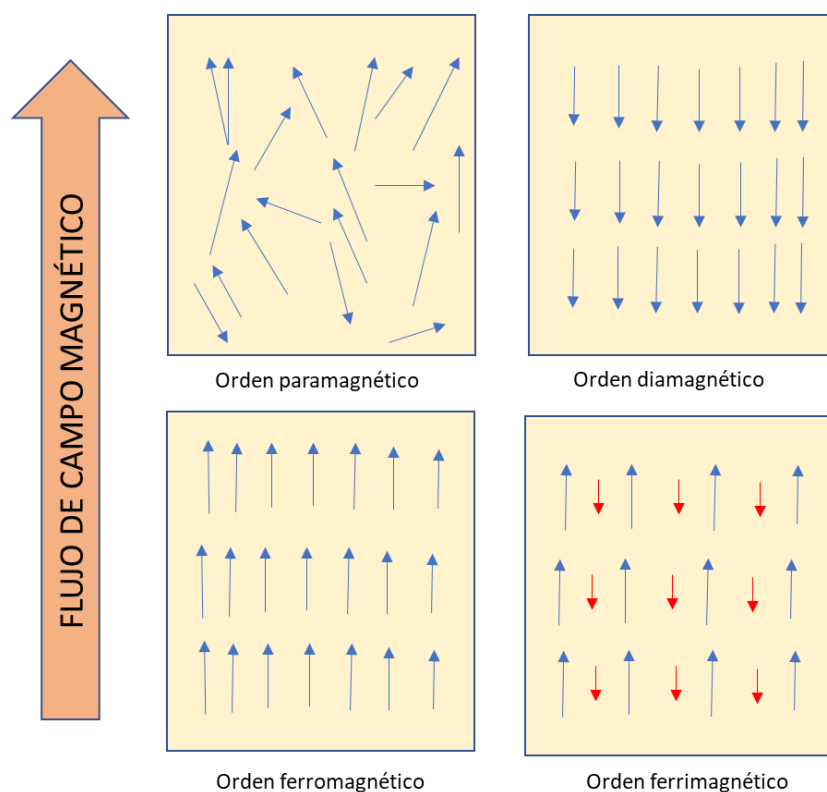


Figura 3. Comportamiento de los materiales magnéticos

A medida que el tamaño de estos materiales disminuye, por ejemplo, en nanopartículas de magnetita, aparecen comportamientos magnéticos nuevos y específicos. Los nanomateriales, hechos de hierro, níquel o cobalto pueden sintetizarse de diversas formas, como precipitación química, procesamiento sol-gel y deposición física de vapor.

Los nanomateriales magnéticos representan una categoría de nanopartículas susceptible a manipulación mediante un campo magnético. Estas partículas típicamente incorporan elementos magnéticos, como hierro, níquel y cobalto, y sus respectivos compuestos químicos, los cuales desempeñan un papel diversificado en varias disciplinas.[18], [38], [46], [51], [52]

Las nanopartículas con mono dominios magnéticos, es decir, con una única zona de magnetización continua, pueden manipularse fácilmente sin la interferencia de dominios múltiples que complicarían su comportamiento. Esto es especialmente útil en sistemas de purificación de agua, ya que las nanopartículas de magnetita tienen una gran superficie que facilita su funcionalización para diversas aplicaciones. [53]

En el caso de la eliminación de grasas y aceites, las nanopartículas magnéticas se pueden modificar para actuar como surfactantes, aprovechando su gran área superficial para adsorber contaminantes oleosos. Además, su baja toxicidad y biocompatibilidad no solo las hacen seguras para el medio ambiente, sino también ideales para aplicaciones en campos como la biotecnología, medicina y tecnologías de saneamiento ambiental.

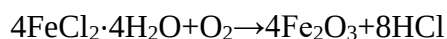
En este contexto, los óxidos de hierro se obtienen mediante una serie de reacciones químicas donde el hierro en el cloruro ferroso se oxida, transformándose en una estructura con propiedades magnéticas únicas que facilitan el desarrollo de sistemas de purificación ambiental. [54]

Es importante entender la relevancia de los compuestos químicos utilizados en la síntesis de óxidos de hierro en el contexto de la obtención de nanopartículas magnéticas, que se emplean en procesos de remoción de contaminantes. Los precursores, como el cloruro ferroso tetahidratado, juegan un papel crucial en las reacciones químicas que conducen a la formación de óxidos de hierro, los cuales tienen propiedades magnéticas que permiten su uso en aplicaciones ambientales. La elección de estos compuestos y la comprensión de las reacciones que facilitan su conversión en nanopartículas magnéticas son esenciales para el desarrollo de materiales eficientes en la eliminación de contaminantes, como los aceites y grasas en cuerpos de agua. En este contexto, los óxidos de hierro se obtienen mediante una serie de reacciones químicas donde el hierro en el cloruro ferroso se oxida, transformándose en una estructura con propiedades magnéticas únicas que facilitan el desarrollo de sistemas de purificación ambiental [54]

2.4.1.1 Cloruro ferroso tetahidratado ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)

La reacción de $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ para la formación de óxidos de hierro implica la exposición del compuesto a condiciones que propicien la oxidación del hierro presente en la estructura molecular. Este proceso puede desencadenarse mediante la aplicación de agentes oxidantes o cambios en el entorno, como la exposición al aire o la aplicación de calor.

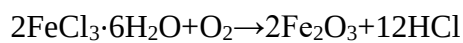
La reacción química específica implicada en la formación de óxidos de hierro a partir del cloruro ferroso tetahidratado se puede representar de manera general como:



Donde el cloruro ferroso tetahidratado reacciona con oxígeno (O_2) para producir óxidos de hierro (Fe_2O_3) y ácido clorhídrico (HCl). Este proceso es fundamental en la síntesis de óxidos de hierro y puede tener aplicaciones en diversas áreas, como la industria de pigmentos, la síntesis de materiales magnéticos y la investigación de nanomateriales.[55], [56]

2.4.1.2 Cloruro ferroso hexahidratado

La conversión de cloruro férrico hexahidratado ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) para la formación de óxidos de hierro implica un proceso de oxidación controlada. Este procedimiento puede llevarse a cabo mediante la aplicación de agentes oxidantes, la exposición al oxígeno atmosférico o la variación de condiciones ambientales, como la temperatura. La reacción química general asociada a este proceso se expresa como:



El cloruro férrico hexahidratado reacciona con oxígeno (O_2), dando lugar a la formación de óxidos de hierro (Fe_2O_3) y ácido clorhídrico (HCl) [52], [53].

2.4.1.3 Hidróxido de sodio

El uso de Hidróxido de sodio (NaOH) en combinación con carbón de hulla bituminosa que presenta propiedades magnéticas en una solución acuosa, es capaz de oxidar las sales de hierro 2 ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) propiciando así una reacción de oxidación, para formar hidróxidos férricos insolubles. La reacción típica implica la precipitación de hidróxido férrico ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) Cuando el hidróxido de sodio se agrega a una solución que contiene iones férricos, todo esto

mediante agitación y calentamiento de la solución. Bajo este contexto, es posible llegar a obtener óxidos magnéticos ideales para un surfactante magnético. [46], [57], [58], [59]

2.4.2 Ferrofluidos

Los ferrofluidos, compuestos por suspensiones coloidales de nanopartículas ferromagnéticas, en un líquido portador, tienen un gran potencial en la purificación de cuerpos de agua contaminados con grasas y aceites. Estas suspensiones, generalmente de nanopartículas de magnetita estabilizadas en agua o aceite mediante surfactantes, poseen la capacidad de responder a campos magnéticos externos sin aglutinarse, gracias al tensioactivo que rodea las partículas. El uso de ferrofluidos permite crear un sistema magnético altamente efectivo para adsorber y separar los contaminantes oleosos en el agua. Al aplicar un campo magnético, las nanopartículas de magnetita del ferrofluido pueden ser manipuladas para capturar aceites y grasas, formando una barrera que facilita su recolección y posterior eliminación del cuerpo de agua. Además de esta aplicación ambiental, los ferrofluidos también se utilizan en otras industrias, desde la grabación magnética hasta el desarrollo de dispositivos médicos y lubricantes magnéticos para maquinaria.[29],[58],[60],[61]

2.5 Materiales porosos

Son materiales de baja densidad destacan por sus propiedades fisicoquímicas, mecánicas y estructurales, las cuales dependen tanto del material de origen como de su arquitectura porosa. Gracias a estas características, pueden cumplir con los requisitos específicos de diversas aplicaciones, ajustándose según el proceso de fabricación aplicado. [62]

Los materiales porosos son sólidos con una estructura llena de pequeños espacios o poros, los cuales permiten el paso o almacenamiento de moléculas. Estos materiales tienen un impacto importante en aplicaciones tecnológicas, especialmente en procesos de transferencia de masa como la adsorción, catálisis, y la inmovilización de sustancias. Por ejemplo, permiten la captura y almacenamiento de moléculas de grasas y aceites contaminantes. Gracias a sus características de adsorción y alta superficie, los materiales porosos pueden mejorar significativamente los procesos de separación en el tratamiento de aguas. Para

optimizar su efectividad, es crucial caracterizar estos materiales y comprender su capacidad de adsorción. [63]

2.5.1 Propiedades

Los materiales porosos presentan varias propiedades clave: una alta *área superficial*, la cual permite una mayor interacción con moléculas externas; una *distribución de tamaño de poro*, que define su capacidad para adsorber o transportar diferentes tipos de moléculas, y una *estabilidad química*, que garantiza su durabilidad y resistencia en distintas aplicaciones. Estas características se pueden estudiar mediante técnicas como la termoporometría, que mide el tamaño y organización de los poros a partir de la variación en el punto de fusión de un líquido en ellos confinado. [63]

2.5.2 Clasificación

Es posible clasificar los materiales porosos bajo distintos criterios, como el tamaño y la forma de sus poros, el tipo de material base o el método de fabricación. Sin embargo, la clasificación según el tamaño y la morfología de los poros es particularmente práctica para determinar las aplicaciones potenciales de estos materiales. Según las pautas de la International Union of Pure y Applied Chemistry (IUPAC), los materiales se agrupan según el tamaño interno del poro, asumiendo una forma cilíndrica, o bien midiendo la distancia entre las superficies internas opuestas en configuraciones distintas. Con estos criterios, los materiales se ordenan como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de materiales porosos acorde a su tamaño

Material	Diámetro
Microporoso	≤ 2 nm
Mesoporoso	entre 2 y 50 nm
Macroporoso	≥ 50 nm

No todos los materiales pueden presentar cualquiera de los tres tipos de poro. Por ejemplo, los microporos suelen originarse directamente en la estructura cristalina, extendiéndose en canales a lo largo del cristal. Es decir, los microporos forman parte fundamental de la red

crystalina, como en el caso típico de las zeolitas. En contraste, en materiales con mesoporos o macroporos, estos se forman en las uniones entre cristales o partículas, lo cual indica que no son propios de la estructura cristalina en sí. [64]

Uno de los materiales de interés en este trabajo es el carbón de hulla bituminosa el cual es un material microporoso. Sus microporos, que suelen tener tamaños menores a 2 nanómetros, están distribuidos en su estructura de manera natural y son producto de la disposición de las moléculas de carbono. Estos poros le dan al carbón su capacidad de adsorber gases y líquidos, haciéndolo útil en aplicaciones de filtración y purificación.

2.5.2.1 Carbón de hulla bituminosa

Este tipo de carbón presenta una estructura que incluye una amplia gama de poros, lo que le permite tener una alta área superficial y un gran volumen de poro, características que son esenciales para su uso en aplicaciones como la adsorción de contaminantes. El carbón de hulla bituminosa es un tipo de carbón mineral que se encuentra entre el lignito y la antracita en la escala de madurez del carbón. Tiene un contenido de carbono de entre el 70 y el 90 %, un contenido de humedad de entre el 10 y el 20 % y un contenido de cenizas de entre el 5 y el 10 %. El carbón de hulla bituminosa se forma a partir de la descomposición de vegetales en un ambiente húmedo y anaeróbico. El proceso de formación dura millones de años, durante los cuales el carbón se somete a un proceso de metamorfismo que aumenta su contenido de carbono y disminuye su contenido de humedad.

El carbón de hulla bituminosa tiene las siguientes propiedades:

1. Color: negro mate.
2. Textura: dura y quebradiza.
3. Densidad: 1,2-1,5 g/cm³.
4. Poder calorífico: 27-35 MJ/kg.
5. Contenido de humedad: 10-20 %.
6. Contenido de cenizas: 5-10 %.
7. Contenido de azufre: 0,5-1,5 %.



Figura 4. Carbón de hulla bituminosa

2.6 Surfactantes magnéticos

2.6.1 Definición

Los surfactantes magnéticos son un tipo de tensioactivo con una fracción magnética unida a él. La fracción magnética puede ser de un metal de transición de alto espín o de cationes lantánidos. La parte magnética puede ser el contraión del tensioactivo o formar parte de su estructura. Los surfactantes magnéticos pueden ser aniónicos, catiónicos y no iónicos. Pueden ser atraídos por un imán y también fluir como un líquido. [23]

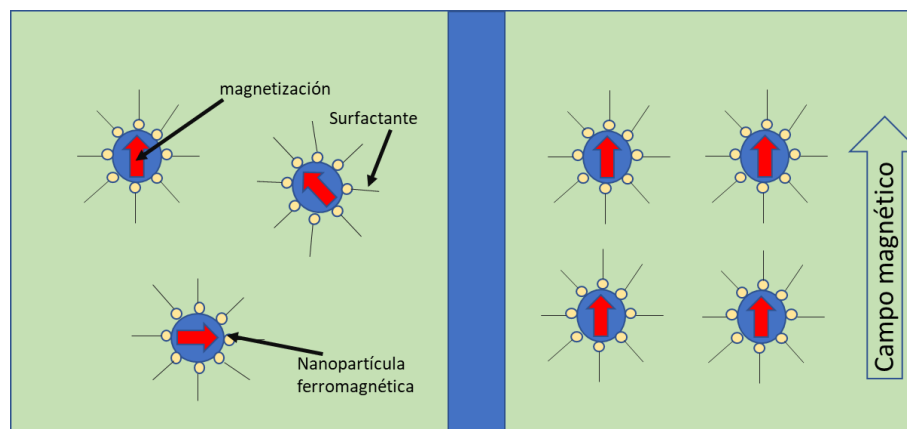


Figura 5. Comportamiento de nanopartículas con incidencia de un campo magnético.

2.6.2 Características de los surfactantes magnéticos

Las nanopartículas presentan un comportamiento ferromagnético y versátil, ampliamente empleados en grabación magnética, pinzas magnéticas y sellos líquidos. En grabación magnética, facilitan la alineación precisa de nanopartículas con el campo magnético del cabezal de grabación, permitiendo un almacenamiento eficiente de información en cintas y discos magnéticos. También son fundamentales en la creación de pinzas magnéticas para la manipulación precisa de objetos diminutos en campos como la investigación médica. Además, desempeñan un papel esencial en la ingeniería de sellos líquidos, cruciales en dispositivos médicos y discos duros [10], [39]

2.6.3 Mecanismo de remoción

En conjunto, el sistema no manifiesta una magnetización neta. En presencia de un campo magnético externo, las magnetizaciones individuales de las nanopartículas tienden a alinearse y producir un efecto de magnetización (Figura 5). Esto hace que un fluido magnético en presencia de un campo magnético externo interactúe con las moléculas que se pretende magnetizar y estas se atraigan al imán permanente.

2.6.4 Adsorbentes tradicionales vs surfactantes magnéticos

Los adsorbentes tradicionales mencionados anteriormente son eficientes, sin embargo, existe una alternativa innovadora para la adsorción de grasas y aceites, utilizando surfactantes magnéticos soportados por materiales porosos. Los surfactantes poseen propiedades magnéticas que permiten una recuperación fácil y rápida tras la adsorción. Además, aplicando un campo magnético, pueden separarse eficazmente del agua, lo que facilita su reutilización y el tratamiento adecuado de sus residuos. [46], [50], [51]

Los surfactantes magnéticos son una alternativa eficaz y respetuosa con el medio ambiente a los métodos tradicionales de adsorción. Estos surfactantes pueden eliminar más grasas y aceites del agua, lo que los hace altamente eficaces. [65]

Además, son respetuosos con el medio ambiente, ya que pueden recuperarse y reutilizarse fácilmente. Por último, los surfactantes magnéticos son rentables, ya que pueden utilizarse repetidamente.

El enfoque novedoso que involucra el uso de surfactantes magnéticos respaldados por materiales porosos presenta numerosas ventajas en comparación con los métodos de adsorción tradicionales, lo que indica que es probable que tenga un uso más extendido en el futuro.[40], [66], [67]

2.7 Caracterización fisicoquímica y magnética de los surfactantes magnéticos

Es un proceso mediante el cual se analizan y determinan las propiedades físicas, químicas, estructurales y morfológicas de un material. Una vez obtenidos los materiales, en este caso los surfactantes magnéticos, el siguiente paso es realizar su caracterización, la cual permite determinar el tamaño de las nanopartículas, así como la distribución o estructura de los átomos que se agrupan para formar las nanopartículas. [68]

2.7.1 Espectroscopía infrarroja (FT-IR)

La espectroscopía analiza cómo interactúa la radiación electromagnética con una sustancia, basada en la diferencia entre la radiación que incide y la que se emite. Esta diferencia energética, conocida como energía de absorción, puede generar cambios en la estructura atómica o molecular de la muestra. Existen diversas formas en que la radiación puede afectar al material de estudio.

La espectroscopía de infrarrojo, específicamente, examina la interacción entre la radiación infrarroja y la materia. La energía de esta radiación, en una longitud de onda particular, puede ser absorbida por moléculas que vibran en su estado basal a la misma frecuencia, causando un aumento en la intensidad de su vibración. Para que se produzca esta absorción de energía infrarroja, la molécula debe tener un momento dipolar, el cual surge del desequilibrio en las cargas eléctricas alrededor de los átomos. Si no hay momento dipolar, no se produce la absorción. La radiación electromagnética contiene un campo eléctrico que oscila a cierta frecuencia. Cuando un fotón incide sobre un dipolo con una frecuencia similar a la del momento dipolar de un enlace molecular, ocurre resonancia, lo que permite que el dipolo absorba el fotón y aumente la amplitud de la vibración de los átomos. Así, la molécula pasa de su estado fundamental de vibración a un estado excitado. [69]

El análisis espectroscópico de infrarrojo produce un espectro de la muestra, que aparece como una serie de bandas o picos de absorción en el rango de infrarrojo. Cada pico representa un tipo de vibración en un enlace atómico específico, reflejando los enlaces presentes en las moléculas de la muestra. [70]

2.7.2 Espectroscopía Raman

La espectroscopía Raman es una técnica analítica que mide la luz dispersada por una muestra para proporcionar información sobre su composición química y estructura molecular. Este método se basa en el efecto Raman, donde una pequeña fracción de la luz láser que incide sobre la muestra cambia de frecuencia debido a interacciones con las vibraciones moleculares, generando un espectro característico de la muestra. Sin embargo, la técnica convencional enfrenta limitaciones como la interferencia por fluorescencia, baja resolución espectral y dificultades para detectar frecuencias bajas.

Para superar estas limitaciones, la espectroscopía Raman asistida por transformada de Fourier en el infrarrojo (FT-Raman) ofrece ventajas significativas, como la reducción de fluorescencia, una mayor precisión en la resolución espectral y la capacidad de analizar frecuencias bajas. [71]

Además, el uso de la transformada de Fourier permite analizar la frecuencia de los fotones con mayor precisión, resultando en espectros de alta resolución que reflejan de manera más exacta la estructura molecular de la muestra, por ello es por lo que resultó una técnica apta para este proyecto.

2.7.3 Microscopía electrónica de barrido SEM

La microscopía electrónica de barrido (SEM) es una técnica avanzada que permite analizar la superficie y estructura de las nanopartículas (NPs), proporcionando información detallada sobre su forma, tamaño y textura. El SEM funciona mediante un haz de electrones concentrado, generado por un cañón de electrones y acelerado en condiciones de vacío. A medida que los electrones se desplazan, pasan por lentes electromagnéticas que los concentran, lo que permite obtener imágenes de alta resolución.

El haz de electrones se mueve sobre la superficie de la muestra en un patrón similar a la lectura de una página. Al interactuar con los átomos de la muestra, los electrones primarios

generan electrones secundarios (SE) y retro dispersados (BSE). Los electrones secundarios provienen de las capas superficiales y son detectados por un sistema especializado, lo que permite analizar la topografía y composición del material.

El SEM puede alcanzar una resolución menor a 1 nanómetro, dependiendo del equipo y condiciones de operación. Además de la observación de la morfología, también se puede realizar análisis composicional mediante técnicas como la espectroscopía de rayos X por dispersión de energía (EDS). Gracias a su capacidad para ofrecer imágenes precisas y detalladas, el SEM es ampliamente utilizado en diversas áreas científicas e industriales. [72]

2.7.4 Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS)

Esta técnica se ha consolidado como una herramienta esencial en una variedad de disciplinas, desde estudios ambientales hasta análisis biomédicos e industriales. Su efectividad radica en la capacidad de identificar y cuantificar elementos a concentraciones extremadamente bajas, lo que la convierte en una opción preferida para mediciones rápidas y confiables. Al utilizar un plasma de argón para ionizar la muestra y un espectrómetro de masas para analizar los iones según su relación masa/carga, la ICP-MS proporciona resultados detallados y exactos, recibiendo la energía de un campo electromagnético de alta frecuencia o de una corriente continua, que puede llegar a alcanzar una temperatura de hasta 8,000 °K, superando así las limitaciones de otras técnicas espectroscópicas.

La ICP-MS es una técnica sólida y ampliamente utilizada en laboratorios de todo el mundo, especialmente para realizar análisis rutinarios debido a su alta precisión y capacidad para detectar elementos. [73]

2.7.5 Difracción de rayos X

La difracción de rayos X (DRX) es una técnica ampliamente empleada para la caracterización de materiales debido a su capacidad para examinar la estructura cristalina de los sólidos sin causarles daño. A través de este método, es posible identificar materiales desconocidos, así como determinar la orientación de monocristales y la presencia de defectos. En el proceso, un haz de rayos X colimado, con longitudes de onda entre 0.7 y 2 Å, incide sobre la muestra y se difracta de acuerdo con la ley de Bragg, que depende de la disposición cristalina. Esta técnica tiene como limitación la baja intensidad de la difracción, lo que a menudo requiere

condiciones controladas para obtener resultados precisos. Sin embargo, uno de los puntos a favor de esta técnica es que no requiere una preparación compleja de las muestras, lo que la hace adecuada para diversas aplicaciones.[68]

Algunos de los métodos utilizados para caracterizar materiales a escala nanométrica, son más adecuados para identificar y clasificar nanopartículas que otros. La microscopía electrónica de barrido (SEM) es una de las técnicas más efectivas para observar la morfología, tamaño y forma de las nanopartículas, permitiendo su identificación visual y clasificación precisa. De manera similar, la difracción de rayos X (XRD), aunque no mide directamente el tamaño de las nanopartículas, puede calcularlo mediante el análisis del patrón de difracción y la ecuación de Scherrer, proporcionando estimaciones precisas del tamaño cristalino de las partículas. Por otro lado, la espectroscopía infrarroja (FT-IR) y la espectroscopía Raman se utilizan para estudiar las propiedades químicas y estructurales de los materiales, pero no ofrecen información directa sobre el tamaño de las nanopartículas. Sin embargo, pueden ser útiles para identificar los grupos funcionales presentes en las nanopartículas y confirmar su estructura. [24], [74]

Además de las técnicas de caracterización previamente descritas, que permiten analizar propiedades estructurales, químicas y físicas de las nanopartículas, es fundamental considerar las características específicas de los materiales magnéticos involucrados en este proyecto. Dado que las nanopartículas desarrolladas poseen propiedades magnéticas clave para su aplicación en la remoción de contaminantes, se recurrió al magnetómetro de muestra vibrante (VSM). Este instrumento permite evaluar y cuantificar las propiedades magnéticas de las nanopartículas, complementando así las caracterizaciones estructurales y químicas al proporcionar información esencial sobre su comportamiento magnético en el contexto de sus aplicaciones.

2.7.6 Magnetómetro de muestra vibrante (VSM)

El magnetómetro de muestra vibrante es un dispositivo ampliamente utilizado en el estudio de materiales magnéticos. Originalmente desarrollado por Foner en 1956, este instrumento permite realizar mediciones precisas de la magnetización de una muestra al hacerla vibrar dentro de un campo magnético uniforme. La vibración de la muestra produce un campo magnético oscilante que es detectado por un sistema de bobinas. Esta oscilación genera una



fuerza electromotriz en las bobinas, la cual es proporcional a la magnetización de la muestra y se registra como una señal de voltaje. Este método resulta especialmente útil para analizar muestras en polvo o nanopartículas magnéticas, como las que se consideran en este proyecto, puesto que permite cuantificar sus propiedades magnéticas incluso con cantidades reducidas de material. La facilidad y versatilidad del VSM también permiten la creación de modelos personalizados y económicos en entornos de investigación, utilizando materiales disponibles en el laboratorio. [75]

Las técnicas mencionadas, aunque tienen distinto fundamento, ayudan a identificar la morfología, el tamaño de las partículas y evalúan su comportamiento magnético, lo que aporta información importante para validar la aplicación en la remoción de grasas y aceites.

Capítulo 3: Metodología

3.1 Primer etapa: Síntesis del surfactante magnético

3.1.1 Experimentos preliminares

Se realizaron diferentes experimentos preliminares con la finalidad de conocer e identificar cuáles son las variables que afectan en el desempeño de un surfactante magnético para la remoción de aceites.

Para el proceso de síntesis, se utilizó un surfactante al que se le agregó una relación molar de sales de hierro ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) de 1M. Se colocaron en un vaso de precipitados y fueron sometidos a temperatura y agitación constantes durante más de 24 horas. Posteriormente, se preparó una solución que contenía una concentración de 1M de hidróxido de sodio (NaOH), a la cual se le añadió el material poroso, que fue carbón de hulla bituminosa. El carbón de hulla utilizado para la impregnación como material poroso en el surfactante magnético fue molido y tamizado obteniendo un tamaño de partícula de 120 μm . Esta solución se incorporó a la mezcla de surfactante y sales de hierro, dejándose calentar y agitar durante 120 minutos.

3.1.2 Experimentos óptimos

Se llevaron a cabo experimentos para determinar las mejores condiciones de síntesis del surfactante que tuviera la mayor respuesta magnética posible. Se diseñó un experimento utilizando un arreglo Taguchi L9, que incluyó 4 factores y 3 niveles. Es decir, este diseño fue planificado para estudiar el efecto de estas cuatro variables en un sistema, como se muestra en la Tabla 2, donde cada factor se evaluó en tres niveles diferentes. [76]

Tabla 2. Factores y niveles del arreglo Taguchi L9 (3^4).

Factores	Niveles		
	1	2	3
Relación Molar: Surfactante/Sales de Hierro	1.5:1	2:1	2.5:1
Concentración NaOH (mol/L)	0.1	0.5	1

Cantidad Carbón de hulla (g)	0.05	0.1	0.5
Temperatura (°C)	70	80	90

Se utilizó el arreglo L9 para maximizar la información obtenida con un número mínimo de experimentos. La Tabla 3 muestra el arreglo L9, en el cual la variable de salida fue la susceptibilidad magnética del material.

Tabla 3. Diseño de experimentos L9 para la síntesis del surfactante magnético.

No. Experimento	Relación molar (Surfactante neutro: $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)	Concentración de NaOH (mol/L)	Masa de carbón de hulla bituminosa (g)	Temperatura (°C)
1	1.5:1	0.1	0.05	70
2	1.5:1	0.5	0.1	80
3	1.5:1	1	0.5	90
4	2:1	0.1	0.05	70
5	2:1	0.5	0.1	80
6	2:1	1	0.5	90
7	2.5:1	0.1	0.05	70
8	2.5:1	0.5	0.1	80
9	2.5:1	1	0.5	90

La medición de la susceptibilidad magnética se realizó siguiendo el método experimental reportado por Sosa et al., el cual consistió en la determinación indirecta a partir de la fuerza ejercida entre la muestra y un imán de características magnéticas conocidas. Dichos valores de fuerza se determinaron mediante el peso registrado por una balanza analítica, en función de la geometría que adoptó la muestra y la distancia que existió entre la muestra y el imán.[48]

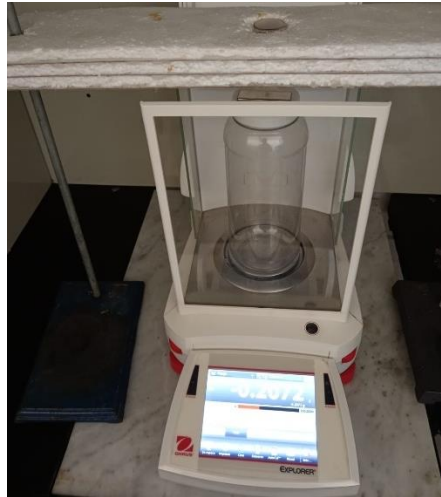


Figura 6. Balanza para la medición de susceptibilidad magnética.

Los valores de fuerza obtenidos en cada medición fueron utilizados en la siguiente ecuación para determinar el valor de la susceptibilidad:

$$F = \chi \mu_0 \frac{3m^2}{64\pi} * \frac{1}{z_0^4} - \frac{1}{z_1^4} - \frac{z_0^2 + \frac{R^2}{3}}{(z_0^2 + R^2)^3} + \frac{z_1^2 + \frac{R^2}{3}}{(z_1^2 + R^2)^3} \dots\dots\dots Ec. 1$$

Despejando de la ecuación anterior, la variable χ se obtiene la siguiente ecuación:

$$\chi = \frac{F}{\mu_0 \left(\left(\frac{3m^2}{64\pi} \right) \left(\frac{1}{z_0^4} - \frac{1}{z_1^4} - \frac{z_0^2 + \frac{R^2}{3}}{(z_0^2 + R^2)^3} + \frac{z_1^2 + \frac{R^2}{3}}{(z_1^2 + R^2)^3} \right) \right)} \dots\dots\dots Ec. 2$$

Donde:

z0 (m)= distancia del centro del imán la cara inferior del cilindro (muestra) = distancia + grosor del vaso

z1(m)= distancia del centro del imán a la parte superior de la columna del líquido = z0+h

h (m)= altura de la muestra

R (m)= radio del cilindro

F (N) = valores reportados de masa (Kg) * gravedad (m/s²)

χ = susceptibilidad magnética

μ_0 (N/A²) = permeabilidad = $4\pi \times 10^{-7}$

$m (Am^2) =$ momento magnético del imán = 1.55724

Se realizaron tres mediciones de peso para cada una de las distancias previamente seleccionadas. Con estos valores medidos, se calculó la susceptibilidad en cada caso. Adicionalmente, se determinó mediante análisis ANOVA si las réplicas de mediciones eran correctas para tener la mayor certeza de las mediciones obtenidas.

3.2 Segunda etapa: Caracterización fisicoquímica y magnética del S.M.S.

La caracterización fisicoquímica y magnética del surfactante magnético es esencial para estudiar las propiedades intrínsecas del material y su relación con la eficiencia en la adsorción de aceites. Por un lado, el estudio fisicoquímico permite identificar la composición, estructura y estabilidad del surfactante, mientras que la caracterización magnética determina su susceptibilidad y respuesta al campo magnético, propiedades críticas para su manipulación y recuperación [77]. En esta etapa, se utilizó el material sintetizado bajo condiciones óptimas, puesto que mostró una mayor susceptibilidad magnética y una mejor eficiencia en los experimentos previos, justificando su selección como modelo para las pruebas de caracterización.

3.2.1 Espectroscopía Infrarroja (FT-IR)

El análisis mediante espectroscopía infrarroja (FT-IR) se realizó utilizando un espectrofotómetro infrarrojo de la marca Thermo Scientific, modelo Nicolet IS10, equipado con un accesorio de reflectancia total atenuada (ATR) Smart iTR. Este accesorio incluye un cristal de germanio que garantiza la obtención de espectros de alta calidad y precisión. Esta técnica es fundamental para identificar los grupos funcionales presentes en el surfactante magnético, permitiendo detectar las bandas características asociadas a enlaces químicos específicos, como grupos hidroxilo, carbonilos o enlaces metálicos. Además, el FT-IR proporciona información sobre la interacción entre los componentes del material, confirmando la correcta incorporación del surfactante a la matriz porosa y la presencia de fases magnéticas como la magnetita o hematita. [78]

3.2.2 Espectroscopía Raman

Los espectros Raman se obtuvieron utilizando un espectrómetro con un láser verde, operando en un rango de 250 a 3500 nm y una longitud de onda de 535 nm. Las muestras analizadas contenían los compuestos principales del surfactante magnético, como $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ y NaOH , combinados con carbón de hulla bituminosa, bajo las condiciones óptimas previamente determinadas.

El uso de la espectroscopía Raman está justificado debido a su capacidad para proporcionar información complementaria a la FT-IR, enfocándose en las vibraciones moleculares específicas y la estructura cristalina del material. Esta técnica es particularmente útil para identificar fases minerales y compuestos metálicos, como la magnetita y hematita, presentes en el surfactante magnético. Además, permite evaluar posibles interacciones entre los componentes y detectar impurezas que podrían afectar el desempeño del material. [79]

3.2.3 Microscopia electrónica de Barrido SEM

Se utilizó para analizar la morfología y composición superficial del surfactante magnético en estado líquido. Durante este análisis, se empleó un haz de electrones enfocado, generado por un cañón de electrones, que interactuó con la muestra produciendo señales como electrones secundarios, retro dispersados y rayos X característicos. Estas señales fueron recopiladas para obtener imágenes de alta resolución, lo que permitió observar la topografía del material y caracterizar su estructura a escala microscópica. [79]

Este método proporcionó información esencial sobre las características superficiales del surfactante, complementando otros métodos de caracterización empleados en el proyecto.

3.2.4 Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS)

Este análisis permitió identificar y cuantificar los elementos presentes en las muestras con una alta sensibilidad, alcanzando concentraciones extremadamente bajas. La técnica se llevó a cabo mediante la ionización de la muestra utilizando un plasma, cuya energía provino de un campo electromagnético de alta frecuencia, alcanzando temperaturas altas. Los iones generados fueron analizados en el espectrómetro de masas en función de su relación masa/carga, proporcionando resultados precisos y detallados. Este procedimiento

complementó las demás técnicas de caracterización, confirmando la composición elemental y validando la eficacia del material sintetizado para su aplicación en la remoción de aceites en aguas residuales.

3.2.5 Difracción de rayos X

Se realizó un estudio utilizando difracción de rayos X, esta técnica permitió analizar la estructura cristalina de los materiales sin comprometer su integridad, facilitando la identificación de fases presentes y la evaluación de la orientación cristalina, así como la detección de posibles defectos en la estructura. Para llevar a cabo el análisis, se empleó un haz colimado de rayos X que interactuó con la muestra, difractándose de acuerdo con la ley de Bragg, lo que depende de cómo están organizados los compuestos a nivel cristalino. Aunque la baja intensidad de las señales de difracción puede representar un desafío para el análisis, se realizaron las pruebas bajo condiciones controladas para asegurar resultados precisos. Este método fue fundamental para validar tanto la estructura como las propiedades cristalinas del surfactante, garantizando su idoneidad para su uso en la eliminación de aceites en aguas residuales.

La mejora de la eficiencia de todos los experimentos se centrará en la susceptibilidad magnética como respuesta de salida. Para evaluar la eficacia de los materiales, se cuantificará la cantidad de material utilizado, el tiempo de fabricación y la eliminación de aceites en cuerpos de agua. Con base en los datos comparativos de cada material, se propuso optimizar y perfeccionar la síntesis para obtener el surfactante magnético con la máxima capacidad de remoción de aceites.

3.3 Tercer etapa: Estudios de adsorción de aceites

Los experimentos propuestos para la eliminación de aceites se llevaron a cabo mediante la evaluación de diversas variables, tales como la relación aceite/surfactante, la temperatura, el pH y el tiempo de contacto. Se realizaron experimentos preliminares de adsorción con el objetivo de establecer un diseño experimental óptimo que considerara todas las variables influyentes en este proceso.

En los ensayos experimentales a nivel de laboratorio se establecieron las condiciones óptimas para la eliminación de aceites en cuerpos de agua. Para ello, se empleó un diseño experimental basado en un arreglo Taguchi L9, considerando cuatro factores evaluados en tres niveles cada uno. Este enfoque permitió analizar la influencia de estas variables en la eficiencia del proceso de remoción. El objetivo principal fue determinar las condiciones que maximicen la eficacia en la eliminación de los aceites, favoreciendo así la mejora de la calidad del agua.

Se llevaron a cabo nueve pruebas en las que se modificó la relación volumétrica del aceite, mientras que el volumen de agua y la cantidad de surfactante magnético adherido al carbón de hulla se mantuvieron inalterados. Con 0.2 gramos de masa de partículas de surfactante magnético, se realizaron los experimentos siguientes:

Tabla 4. Diseño de experimentos L9 para la remoción de aceites

Experimento	V/V	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	MS/VS	Aceite (mL)	Agua (mL)
1	(1/4)	20	15	0.1	2	8
2	(1/4)	50	60	0.2	2	8
3	(1/4)	80	120	0.3	2	8
4	(1/1)	20	60	0.3	5	5
5	(1/1)	50	120	0.1	5	5
6	(1/1)	80	15	0.2	5	5
7	(4/1)	20	120	0.2	8	2
8	(4/1)	50	15	0.3	8	2
9	(4/1)	80	60	0.1	8	2

En cada prueba se registró el volumen de aceite y agua tanto antes como después de la remoción, lo que permitió calcular el porcentaje de aceite eliminado en el agua. Al aplicar un factor de relación inicial entre los volúmenes de aceite y agua, se pudo estimar la cantidad de aceite que fue removida (Ec. 3).

$$R_0 = \frac{mL_{aceite}}{mL_{agua}} = mL_{aceite} \text{ por } mL_{agua} \dots\dots\dots Ec. 3$$



También se utilizó un factor de relación final con el propósito de poder evaluar la cantidad removida de aceite por cantidad de masa de surfactante magnético empleada (ec. 4).

$$R_f = \frac{R_0 \text{ después de la remoción}}{\text{masa de partículas después de la remoción}} \dots\dots\dots \text{Ec. 4}$$

La remoción se llevó a cabo mediante la aplicación de un campo magnético generado por un imán permanente de Neodimio (NdFeB), que tiene una potencia de 32 MGOe (fuerza) y una densidad de flujo magnético nominal de 1 T, que indica su intensidad del campo magnético. La función del imán era retener las partículas del surfactante magnético adherido a una base carbonosa, mientras que se separaba la fase líquida en otro recipiente para poder medir de nuevo el volumen.

Capítulo 4: Resultados

4.1 Primer etapa: Síntesis del surfactante magnético

4.1.1 Experimentos preliminares

La obtención de un material con susceptibilidad magnética es crucial para el desarrollo del surfactante magnético soportado (S.M.S.), ya que determina su capacidad para responder a un campo magnético externo y facilita su recuperación. En la Tabla 5, se presentan los resultados preliminares de susceptibilidad magnética obtenidos durante los experimentos. Estos valores muestran la influencia de las condiciones de síntesis en las propiedades magnéticas del material.

Tabla 5. Resultados de susceptibilidad magnética de experimentos preliminares

Experimento	Medición de susceptibilidad
M1	4.31×10^{-12}
M2	3.48×10^{-10}
M3	6.62×10^{-10}
M4	1.71×10^{-11}
M5	7.36×10^{-10}
M6	8.84×10^{-10}
M7	4.75×10^{-12}
M8	1.02×10^{-09}
M9	1.04×10^{-09}

En la Figura 7, se ilustra el montaje experimental utilizado para medir la susceptibilidad magnética (Figura 7a) y el comportamiento del S.M.S. al someterlo a un campo magnético externo (Figura 7b). Las imágenes demuestran cómo el material responde de manera homogénea al campo aplicado, indicando una distribución uniforme de las partículas magnéticas en la matriz porosa.



Figura 7. (a) Experimento para medición de su susceptibilidad magnética, (b) Comportamiento del S.M.S. ante la presencia de un campo magnético externo.

4.2.2 Experimentos óptimos

Los parámetros óptimos para la síntesis del S.M.S. se determinaron a través de un análisis sistemático de las condiciones experimentales, como se detalla en la Tabla 6. Según Useche et al., optimizar las condiciones de síntesis, incluyendo la proporción de surfactante y las concentraciones de reactivos, permite ajustar propiedades clave de las partículas, como el tamaño, la distribución y la estabilidad [75]. Estos ajustes son fundamentales, puesto que impactan directamente en la funcionalidad del material, especialmente en aplicaciones de remediación ambiental. En este contexto, la concentración de NaOH resultó ser un factor relevante, ya que aceleró la oxidación de las sales de hierro y favoreció la formación de magnetita (Fe_3O_4) y hematita (Fe_2O_3). Esta transformación incrementó significativamente la susceptibilidad magnética del material, lo que refuerza la importancia de una adecuada optimización en el proceso de síntesis para mejorar el rendimiento en aplicaciones específicas.

Tabla 6. Condiciones óptimas para la síntesis del S.M.S

Línea	Nivel
Relación molar (surfactante/sales de Hierro)	2 (2:1 M)
Concentración de Hidróxido de Sodio	3 (1 gr.)
Concentración de Carbón de Hulla Bituminosa	2 (0.1 gr.)
Temperatura	3 (90°C)

Susceptibilidad magnética del S.M.S = 7.04438×10^{-8}

En la Figura 8 se observa la relación señal/ruido correspondiente a los diferentes parámetros y niveles estudiados, destacando la influencia positiva del NaOH en la calidad magnética del material sintetizado. Según Morales y Torres, el NaOH desempeña un papel fundamental en la síntesis de nanopartículas magnéticas, ya que controla el pH del medio de reacción, lo que favorece la formación de fases como la magnetita (Fe_3O_4) y la hematita (Fe_2O_3). Durante el proceso de coprecipitación química, el NaOH facilita la oxidación controlada de las sales de hierro, promoviendo así la nucleación y el crecimiento uniforme de las partículas magnéticas. Además, el aumento del pH incrementa la saturación magnética del material al minimizar la formación de impurezas, lo que resulta en una mayor susceptibilidad magnética [76].

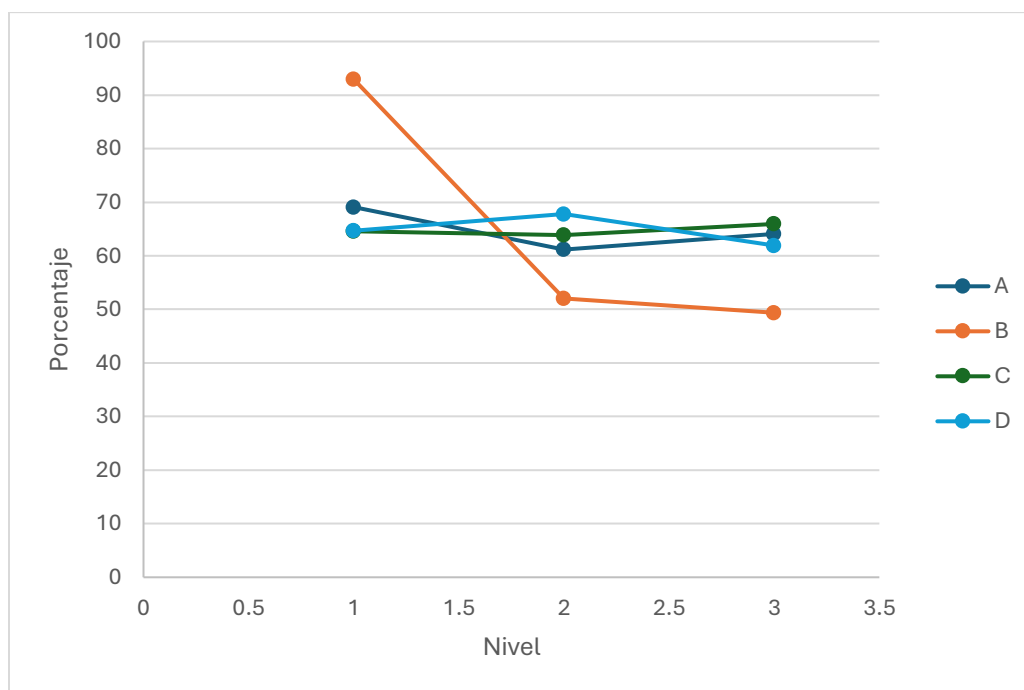


Figura 8. Señal/ruido de los parámetros y niveles del proceso de síntesis del surfactante magnético.

Con base en los resultados, las condiciones óptimas para la síntesis del S.M.S. se establecieron como:

- Relación molar surfactante/sales de hierro: 2:1
- Concentración de NaOH: 1 gramo

- Concentración de carbón de hulla bituminosa: 0.1 gramos
- Temperatura: 90 °C

Como ya se mencionó, bajo estas condiciones, se obtuvo un material con una susceptibilidad magnética de 7.04438×10^{-8} , lo que respalda su potencial aplicación en la remoción de aceites. Es importante mencionar que estas condiciones favorecen tanto la formación de las fases magnéticas como la incorporación uniforme del surfactante en la matriz porosa, haciendo así aún más eficiente el material.

El éxito en la optimización de estos parámetros representa un avance significativo en la síntesis del S.M.S., estableciendo una base sólida para su posterior caracterización y evaluación en los estudios de adsorción de aceites.

4.2 Segunda etapa: Caracterización fisicoquímica y magnética del S.M.S.

4.2.1 Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)

Según Rincón y González, las técnicas de caracterización como FT-IR y Raman son herramientas esenciales para confirmar la presencia de fases magnéticas y grupos funcionales en nanopartículas. Estos métodos permiten evaluar la integración del surfactante en la matriz porosa y la formación de enlaces químicos que estabilizan el material [77]. El análisis FT-IR facilitó la identificación de los grupos funcionales presentes en el S.M.S., y se compararon los espectros FT-IR del surfactante, el S.M.S. y el carbón de hulla bituminosa. Aunque las bandas del carbón están parcialmente cubiertas por el surfactante, se observaron diferencias claras entre los espectros, lo que evidencia la exitosa integración del surfactante magnético en el material poroso. Este hallazgo resalta la importancia de las técnicas espectroscópicas en la caracterización de materiales compuestos, tal como se ha documentado en estudios previos donde se utilizaron métodos similares para analizar nanopartículas magnéticas. Las principales absorciones encontradas incluyen:

1. 3458 cm^{-1} : Está asociada a los grupos hidroxilo (O-H), indicando la presencia de agua adsorbida y grupos funcionales superficiales que pueden estar relacionados con el surfactante o la matriz porosa.

2. 2930-2850 cm^{-1} : Corresponde a los alcanos C-H, que reflejan la estructura alifática del surfactante utilizado.
3. 2581 cm^{-1} : Relacionada con los mercaptanos (S-H), evidencia de enlaces sulfurados, posiblemente derivados de impurezas en el carbón de hulla bituminosa.
4. 1869 cm^{-1} : Identificada como una banda de anhídridos C=O, presente por la oxidación superficial del material.
5. 1626 cm^{-1} : Representa a los alquenos (C=C), que podrían derivar de compuestos aromáticos en el carbón de hulla o el surfactante.
6. 1260-1000 cm^{-1} : Asociada a los alcoholes (-OH) destacando interacciones del surfactante con la matriz magnética.

En la Figura 9 se muestra el espectro del S.M.S. (línea roja) el cual muestra diferencias significativas en comparación con los espectros del surfactante puro (línea negra) y el carbón de hulla bituminosa (línea azul). Estas diferencias evidencian la integración exitosa del surfactante en la matriz magnética y su interacción con los componentes porosos y magnéticos del material.

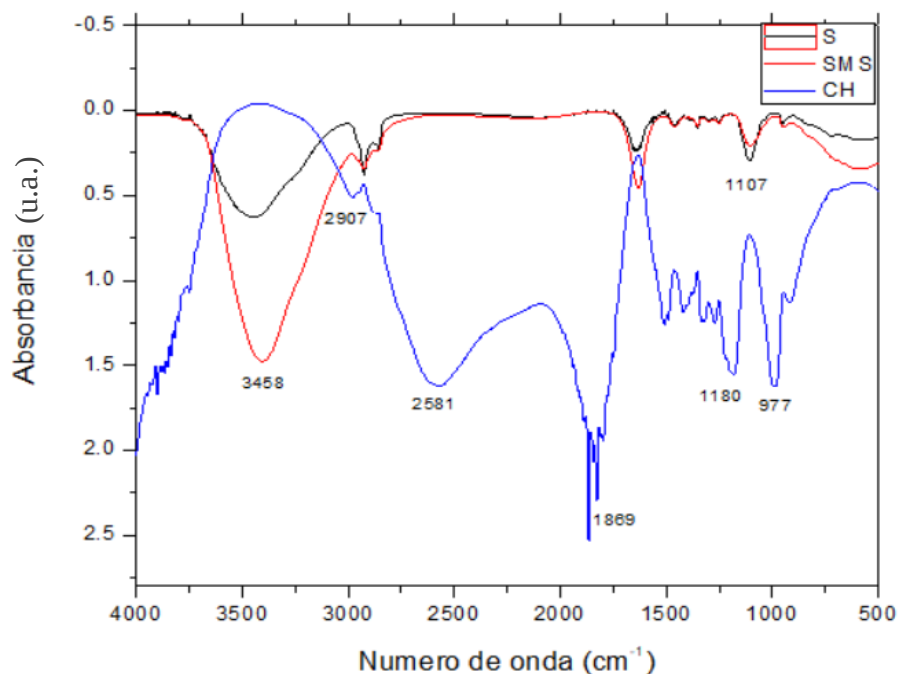


Figura 9. Espectro FT-IR para el surfactante vs S.M.S vs carbón de hulla bituminosa.

4.2.2 Espectroscopia Raman

La espectroscopía Raman confirmó la presencia de fases magnéticas en el S.M.S., identificándose picos característicos de hematita (Fe_2O_3) y magnetita (Fe_3O_4). De acuerdo con Rincón y González, la espectroscopía Raman es una técnica esencial para identificar las fases cristalinas presentes en materiales magnéticos [77]. Los picos de la hematita aparecen cerca de 217 cm^{-1} , 283 cm^{-1} y 1322 cm^{-1} , mientras que los de la magnetita se ubican alrededor de 596 cm^{-1} y 648 cm^{-1} . En la Figura 10, se muestra el espectro Raman del S.M.S., donde se aprecian claramente estas señales, corroborando la coexistencia de ambas fases magnéticas en el material.

Además, el espectro muestra otros picos relevantes. El pico en 398 cm^{-1} está relacionado con vibraciones de deformación de los enlaces Fe-O en estructuras cristalinas desordenadas, lo que es característico de materiales con mezclas de óxidos de hierro o un grado de cristalinidad moderado. Por su parte, el pico en 1551 cm^{-1} se asocia con modos vibracionales de grupos funcionales presentes en el recubrimiento magnético, como enlaces C=C en compuestos orgánicos, posiblemente derivados del carbón de hulla bituminosa o del surfactante. Finalmente, el pico en 1859 cm^{-1} podría atribuirse a combinaciones armónicas o sobre tonos de vibraciones características de los óxidos de hierro, o bien a interacciones entre el surfactante y la superficie del material magnético.

La identificación de estos picos no solo confirma la naturaleza magnética del S.M.S., sino que también evidencia la complejidad estructural del material y las interacciones químicas entre las fases magnéticas y los componentes del surfactante. Esto refuerza la eficacia del diseño de síntesis para integrar propiedades magnéticas y químicas en un material multifuncional.

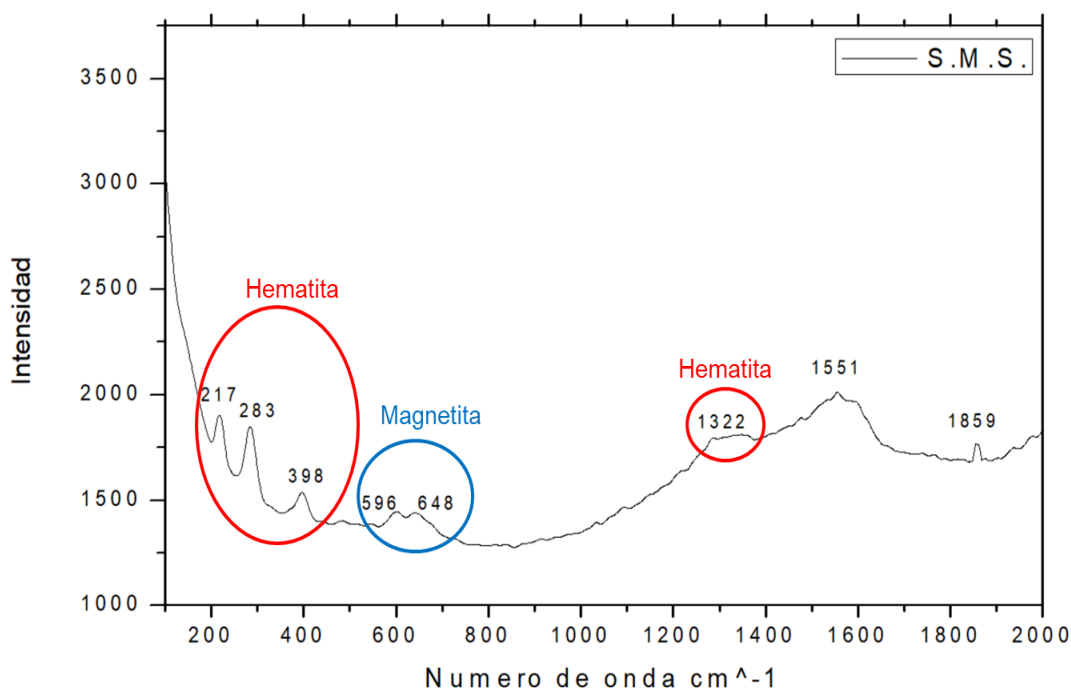


Figura 10. Espectro Raman para S.M.S

4.2.3 Espectroscopia de difracción de rayos X

El análisis de difracción de rayos X reveló una estructura cristalina definida en el S.M.S., con regiones correspondientes a hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4) y cloruro de sodio (NaCl). En la Tabla 7, se presentan los índices de Miller asociados a los picos más intensos del difractograma, confirmando la naturaleza cristalina del material.

Tabla 7. Índices de Miller para muestra de S.M.S.

Parámetro de red	Hematita	Magnetita	Cloruro de sodio
X	5.04	8.37	5.64
Y	5.04	8.37	5.64
Z	13.75	8.37	5.64
Sistema cristalino	Prisma cuadrangular	Cubo	Cubo

En la Figura 11 se muestra el difractograma, donde los picos característicos de la magnetita y la hematita indican su formación exitosa durante el proceso de síntesis.

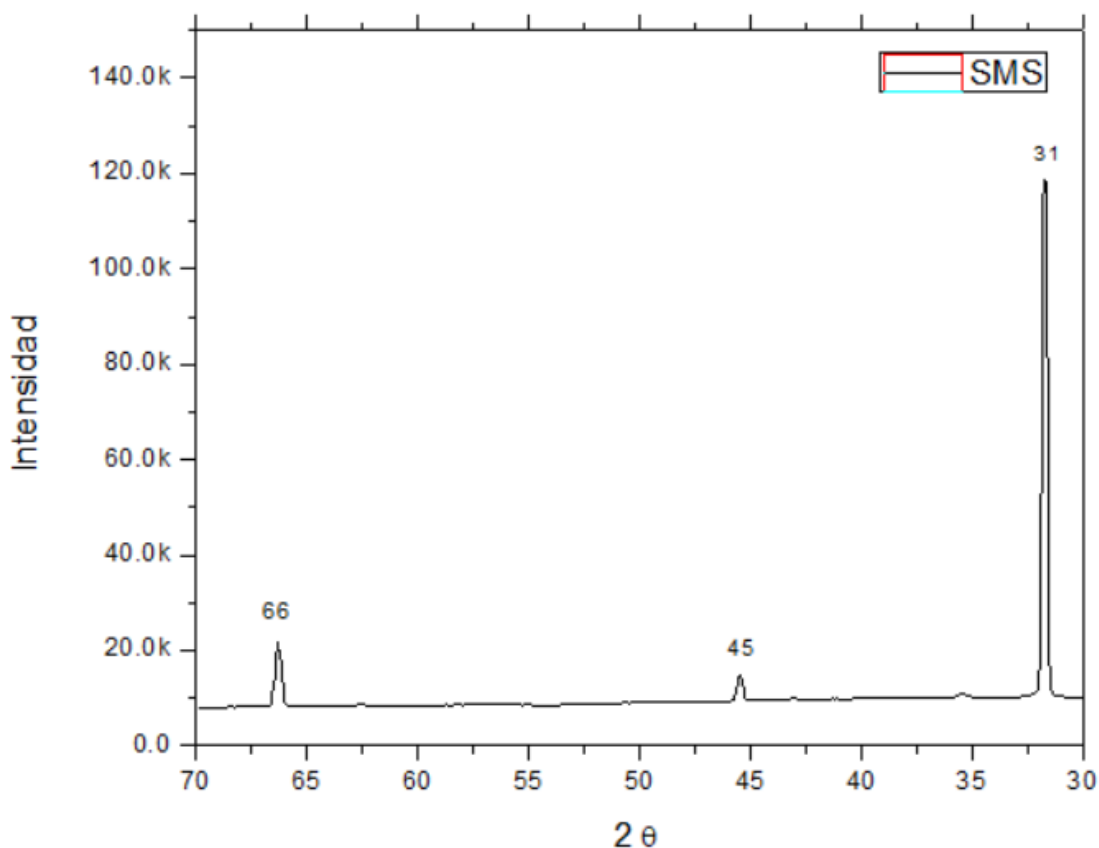


Figura 11. Difractograma de rayos X para el S.M.S.

4.2.4 Microscopia electrónica de barrido SEM

Las imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) permitieron analizar la morfología del S.M.S. Como menciona Clavijo, la SEM es una herramienta clave para estudiar la morfología y topografía superficial de materiales a nivel micro y nanométrico [78]. Gracias a esta técnica, se evidenció una distribución uniforme de las partículas finas, con tamaños que varían desde 142.4 nm hasta 5.9 μm en la matriz porosa. En la Figura 12, se pueden observar estructuras homogéneas, confirmando de esta manera la integración del

surfactante magnético en el material. Esta técnica fue esencial para comprender la organización de las partículas y su interacción con el soporte poroso.

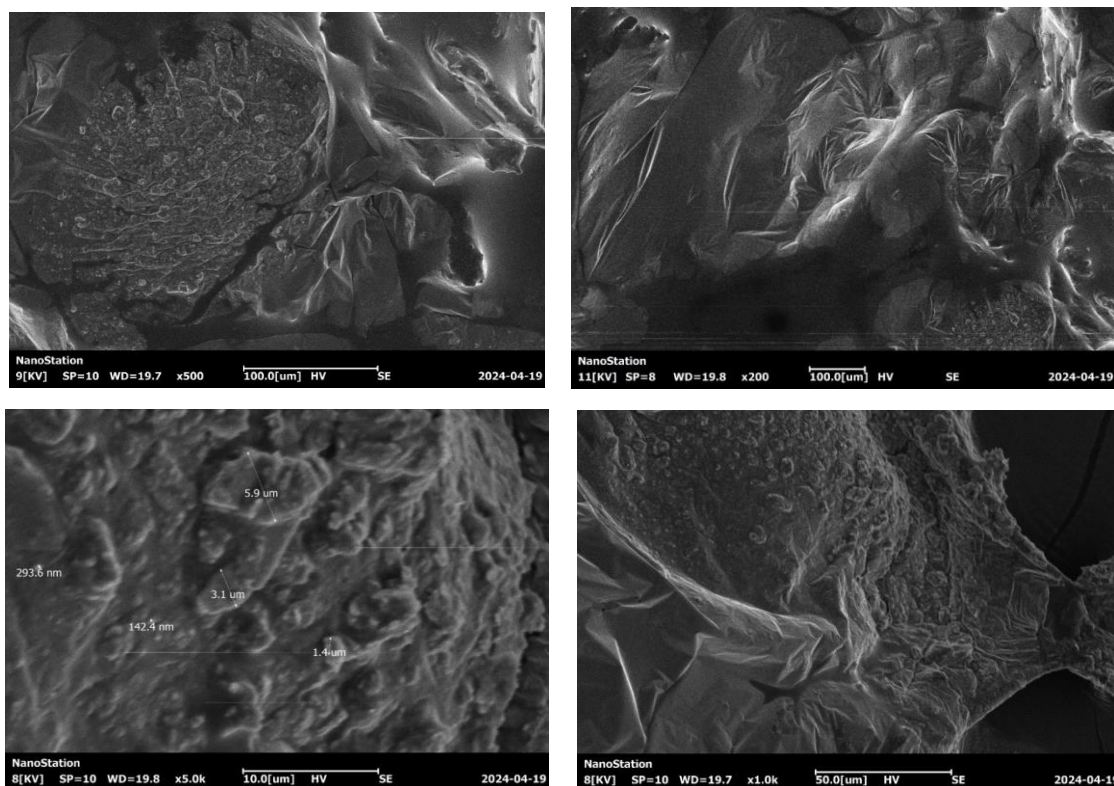


Figura 12. Imágenes SEM del S.M.S.sintetizado

4.2.5 Espectroscopia de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS)

El análisis ICP-MS determinó la composición elemental del S.M.S., identificando elementos presentes en la estructura magnética. En la Tabla 8, se presentan los resultados obtenidos, destacando que este método no detecta la parte orgánica del material, como el surfactante y el carbón de hulla.

Tabla 8. Elementos presentes en muestra de S.M.S.

Concentración (mg/L)	Muestra	
	Surfactante magnético	Porcentaje de composición (%)
Boro (B)	0.01	0.04
Cadmio (Cd)	0.01	0.04
Cromo (Cr)	0.01	0.04
Hierro (Fe)	15.79	71.12
Manganeso (Mn)	0.03	0.13
Sodio (Na)	6.31	28.42
Niquel (Ni)	0.02	0.09
Plomo (Pb)	0.01	0.04
Selenio (Se)	0.01	0.04

De acuerdo con Jiménez-Heinert et al., el ICP-MS es particularmente útil para identificar la composición elemental, como el contenido de hierro, sodio y otros elementos críticos, que influyen directamente en las propiedades funcionales de un material. Mediante el análisis ICP-MS, fue posible identificar hierro (Fe) y sodio (Na) como los principales componentes del S.M.S., con porcentajes de 71.12 % y 28.42 %, respectivamente (Tabla 8). Esta elevada concentración de Fe se relaciona directamente con las fases magnéticas de hematita (Fe_2O_3) y magnetita (Fe_3O_4), confirmadas previamente mediante espectroscopía Raman, que otorgan al material sus propiedades magnéticas. La capacidad del ICP-MS para realizar análisis multielementales y su alta sensibilidad hacen de esta técnica una herramienta esencial para comprender la composición y las propiedades de los materiales analizados [79]. Por su parte, la abundancia de Na podría deberse al origen natural del soporte poroso, como trazas de compuestos salinos o impurezas derivadas de su procesamiento. Este elemento, aunque no esencial para las propiedades magnéticas, está asociado intrínsecamente al material base utilizado.

4.2.6 Curva B-H del S.M.S

Se utilizó un magnetómetro de muestra vibrante para analizar el comportamiento magnético del SMS, que actúa como un material paramagnético a 300 K. En este gráfico, B representa la densidad de flujo magnético y H es el campo magnético aplicado. El material no mantuvo la magnetización al quitar el campo externo, y los momentos magnéticos atómicos se

alinearon en la dirección del campo. La curva B-H del SMS, que aparece en la Figura 13, ilustra que el material se alinea con el campo aplicado, pero no retiene magnetización al retirarlo. Esto demuestra que se puede manipular magnéticamente sin causar efectos secundarios.

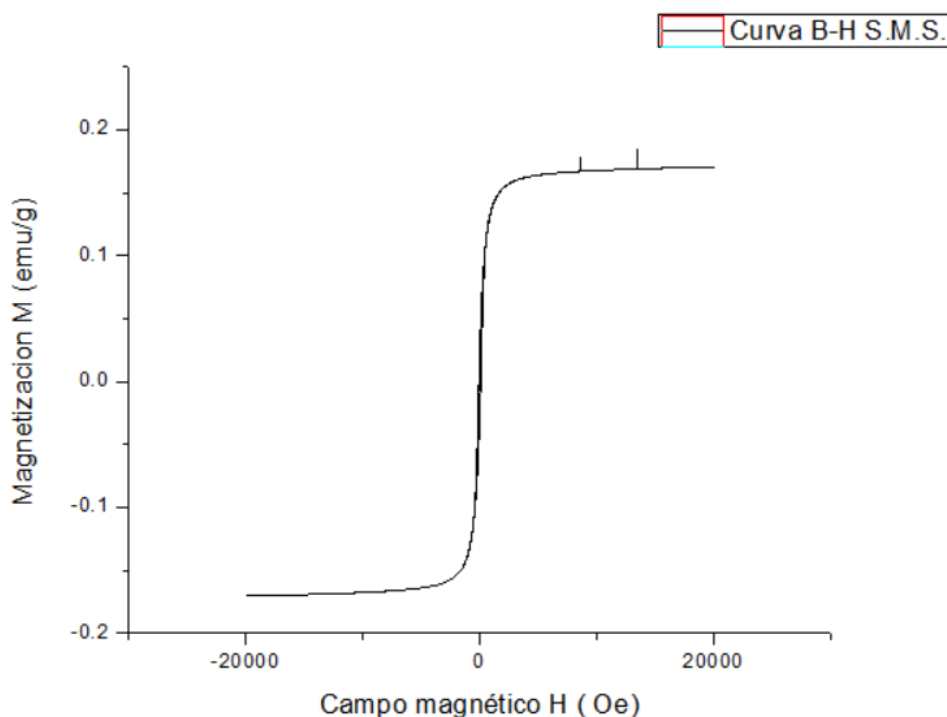


Figura 13. Curva B-H del S.M.S.

4.3 Tercer etapa: Estudios de adsorción de aceites

Para evaluar la aplicación práctica del S.M.S., se realizaron pruebas preliminares y finales de remoción de aceites, enfocándose en la eficiencia del material bajo diferentes condiciones.

4.3.1 Experimentos preliminares

En estos experimentos, se utilizó una mezcla de agua desionizada y aceite vegetal en una proporción de 50/50, la cual fue sometida a un campo magnético externo. Según González-Vázquez et al., las partículas más grandes y densas son arrastradas con mayor facilidad por un campo magnético debido a la mayor fuerza de atracción que experimentan. Esto se debe a que la fuerza magnética es proporcional al volumen magnético efectivo de las partículas,

lo que implica que las partículas de mayor tamaño poseen un mayor momento magnético [80]. En este contexto, la Tabla 9 presenta los resultados que indican que las partículas más grandes y densas son efectivamente arrastradas con mayor facilidad por el campo magnético. Las condiciones experimentales incluyeron tamaños de partículas de carbón de hulla bituminosa de 125 y 595 μm , y la solución fue mantenida en un termo baño durante 15 minutos a 150 rpm y 30 °C.

Tabla 9. Resultados de experimentos preliminares de remoción de aceite utilizando S.M.S. en una mezcla de agua desionizada y aceite vegetal con una relación 50/50.

Masa inicial de S.M.S. (g)	Masa saturada de S.M.S (g)	Porcentaje de remoción de aceite (%)	Capacidad de remoción ($\text{g}_{\text{aceite}}/\text{G}_{\text{S.M.S}}$)
0.4212	0.7492	7.9747	0.7787
0.4561	0.8128	8.6725	0.782
0.4179	0.7658	8.4585	0.8324

4.3.2 Experimentos finales

Se llevaron a cabo 3 réplicas para cada uno de los 9 experimentos, utilizando diferentes tipos de aceites: aceite vegetal nuevo, aceite vegetal usado, aceite nuevo para automóvil y aceite usado para automóvil, todos con 10ml de volumen de solución. Se realizó un análisis ANOVA para determinar la influencia relativa de cuatro factores principales: relación aceite/agua, temperatura, tiempo de contacto y cantidad de surfactante.

4.3.2.1 Remoción de aceite vegetal

El aceite vegetal nuevo presentó niveles altos de remoción debido a su baja viscosidad y homogeneidad, como se muestra en la tabla 10.

Tabla 10. Promedio de las réplicas de experimentación con aceite vegetal nuevo.

Ex p	Aceite	Agua	Temp. (°C)	Tiempo (min)	Surfactante (gr)	SMS (gr)	SMS con aceite (gr)	Vaso sin tapa (gr)	Peso SMS con aceite y vaso (gr)
1	2ml	8 ml	30	15	1	1.0198	1.3831	11.1407	12.5238
2	2ml	8 ml	50	60	2	2.0516	2.1079	11.1761	13.2840
3	2ml	8 ml	80	120	3	3.0844	2.3845	11.1385	13.5230
4	5ml	5ml	30	60	3	3.0591	3.5466	11.3312	14.8777

5	5ml	5ml	50	120	1	1.0349	1.1824	11.2693	12.4517
6	5ml	5ml	80	15	2	2.0522	1.0506	11.2473	12.2979
7	8ml	2ml	30	120	2	2.0823	1.2794	11.3013	12.5807
8	8ml	2ml	50	15	3	3.0451	3.4947	11.1419	14.6366
9	8ml	2ml	80	60	1	1.0866	1.8465	11.1580	13.0045

En la Figura 14 se presentan los niveles de remoción para aceite vegetal nuevo. Los resultados muestran una alta eficiencia de remoción debido a la viscosidad relativamente baja y la homogeneidad del aceite, que facilita su interacción con el S.M.S.

El análisis mostró que el tiempo de contacto fue el factor más influyente en la remoción de este aceite, contribuyendo significativamente al aumento de la eficiencia. La relación aceite/agua fue el factor con menor impacto, ya que el comportamiento de remoción fue consistente independientemente de esta variable. En base a esto, se establecieron las condiciones óptimas para la remoción del aceite vegetal nuevo. En primer lugar, se determinó que la relación entre el aceite y el agua debe ser de 8 a 2. Además, la temperatura ideal para este proceso es de 80 grados Celsius. El tiempo de contacto necesario para lograr una remoción efectiva es de 120 minutos. Por último, se requiere una cantidad de surfactante de 3 gramos para facilitar la eliminación del aceite.

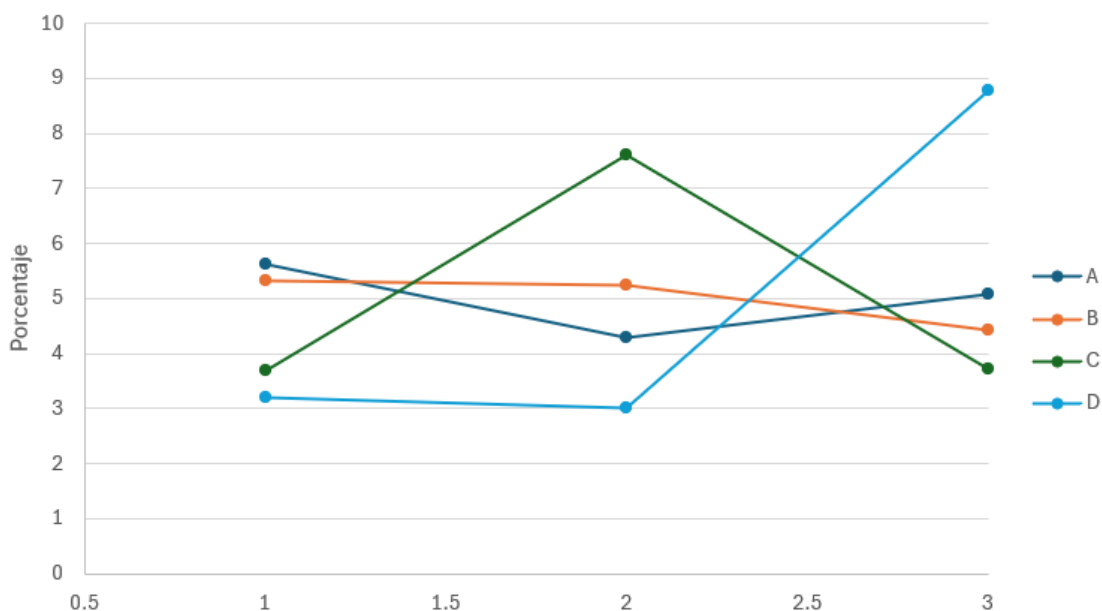


Figura 14. Señal/ruido de los parámetros y niveles de remoción del S.M.S. para el aceite vegetal nuevo, en donde A es la relación aceite-agua (v/v); B es la temperatura (C°); C el tiempo (min) y D la relación (m/v).

Por otro lado, en la tabla 11 se muestran los resultados con el aceite vegetal usado, la eficiencia es ligeramente mayor que para el aceite nuevo, el S.M.S. demostró ser capaz de capturar componentes oxidados presentes en el aceite usado, manteniendo un rendimiento consistente como se muestra en la Figura 15.

Tabla 11. Promedio de las réplicas de experimentación con aceite vegetal nuevo.

Exp	Aceite	Agua	Temp (°C)	Tiempo (min)	Surfactante (gr)	SMS (gr)	SMS con aceite (gr)	Vaso sin tapa (gr)	Peso SMS con aceite y vaso (gr)
1	2ml	8 ml	30	15	1	1.1109	1.0968	11.3854	12.4822
2	2ml	8 ml	50	60	2	2.2267	2.1799	11.3833	13.5632
3	2ml	8 ml	80	120	3	3.1535	3.0356	11.2830	14.3186
4	5ml	5ml	30	60	3	3.1096	2.9404	11.3955	14.3359
5	5ml	5ml	50	120	1	1.2142	1.1436	11.3320	12.4756
6	5ml	5ml	80	15	2	2.0545	2.1143	11.2107	13.3250
7	8ml	2ml	30	120	2	2.2072	2.4059	11.1067	13.5126
8	8ml	2ml	50	15	3	3.2503	2.9845	11.2686	14.2531
9	8ml	2ml	80	60	1	1.2011	1.4245	11.2788	12.7033

El análisis ANOVA reveló que, en el caso del aceite vegetal usado, la temperatura fue el factor más influyente en el proceso de remoción, ya que contribuye a reducir la viscosidad del aceite. Según Ramírez et al., la temperatura es un elemento determinante en la remoción de aceites debido a su impacto directo sobre la viscosidad. A medida que la temperatura aumenta, esta propiedad del aceite disminuye exponencialmente, lo que facilita su flujo y mejora la interacción con la superficie del adsorbente. Este fenómeno es especialmente relevante en aceites usados, que suelen contener contaminantes y compuestos oxidados que incrementan su densidad y resistencia al movimiento, dificultando así su remoción [81]. Por otro lado, la cantidad de surfactante tuvo el menor impacto, ya que con cantidades moderadas se logró una alta eficiencia. Se definieron las condiciones óptimas para la remoción del aceite: una proporción de 5:5 entre aceite y agua, una temperatura de 80 grados Celsius, un tiempo de contacto de 120 minutos y una dosis de 2 gramos de surfactante para facilitar la eliminación.

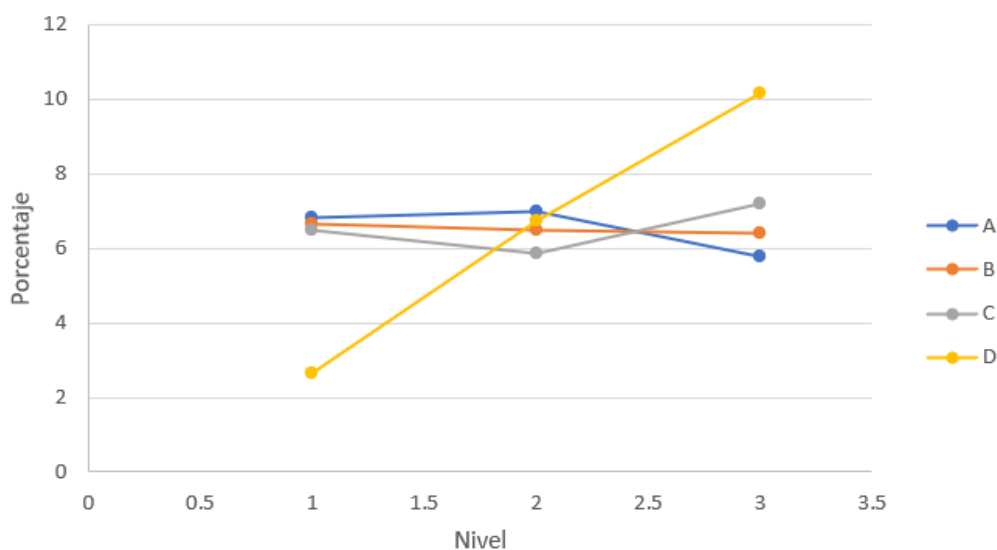


Figura 15. Señal/ruido de los parámetros y niveles de remoción del S.M.S. para el aceite vegetal usado, en donde A es la relación aceite-agua (v/v); B es la temperatura (C°); C el tiempo (min) y D la relación (m/v).

4.3.2.2 Remoción de aceite para auto

La Figura 16 ilustra los niveles de remoción del aceite nuevo de automóvil. Se observó que la eficiencia de remoción disminuyó en comparación con los aceites vegetales, lo cual se atribuye a la compleja composición química del aceite automotriz. Según Martínez et al., la

facilidad para remover aceites vegetales radica en su composición más simple, que está predominantemente formada por triglicéridos, moléculas apolares relativamente homogéneas y de menor viscosidad. Esta estructura química favorece su interacción con los adsorbentes y facilita su separación del agua. En contraste, los aceites automotrices contienen aditivos químicos, metales pesados y compuestos de alto peso molecular, lo que incrementa su complejidad química y resistencia al flujo, dificultando así su remoción [82]. Además, los contaminantes presentes en los aceites automotrices usados pueden interactuar con el adsorbente, saturando las superficies activas y reduciendo la eficiencia del proceso de remoción.

Tabla 12. Promedio de las réplicas de experimentación con aceite de auto nuevo.

Exp	Aceite	Agua	Temp (°C)	Tiempo (min)	Surfactante (gr)	SMS (gr)	SMS con aceite (gr)	Vaso sin tapa (gr)	Peso SMS con aceite y vaso (gr)
1	2ml	8 ml	30	15	1	1.1085	1.4684	11.2101	12.6785
2	2ml	8 ml	50	60	2	2.2281	2.0981	11.2209	13.3190
3	2ml	8 ml	80	120	3	3.1304	3.2253	11.2346	14.4599
4	5ml	5ml	30	60	3	3.1600	3.3907	11.2215	14.6121
5	5ml	5ml	50	120	1	1.1363	1.4696	11.1456	12.6152
6	5ml	5ml	80	15	2	2.1607	2.2128	11.0958	13.3086
7	8ml	2ml	30	120	2	2.1469	2.1611	11.1336	13.2947
8	8ml	2ml	50	15	3	3.2493	2.9910	11.3632	14.3542
9	8ml	2ml	80	60	1	1.1502	1.1633	11.3150	12.4782

La temperatura fue el factor más determinante, al disminuir la resistencia del aceite a la interacción con el S.M.S mientras que la relación aceite/agua tuvo el menor impacto en la remoción. Se determinaron las condiciones óptimas para la remoción del aceite vegetal nuevo. La relación entre el aceite y el agua debe ser de 5 a 5, con una temperatura de 80 grados Celsius. El tiempo de contacto necesario es de 120 minutos, y se requiere una cantidad de 3 gramos de surfactante para facilitar el proceso.

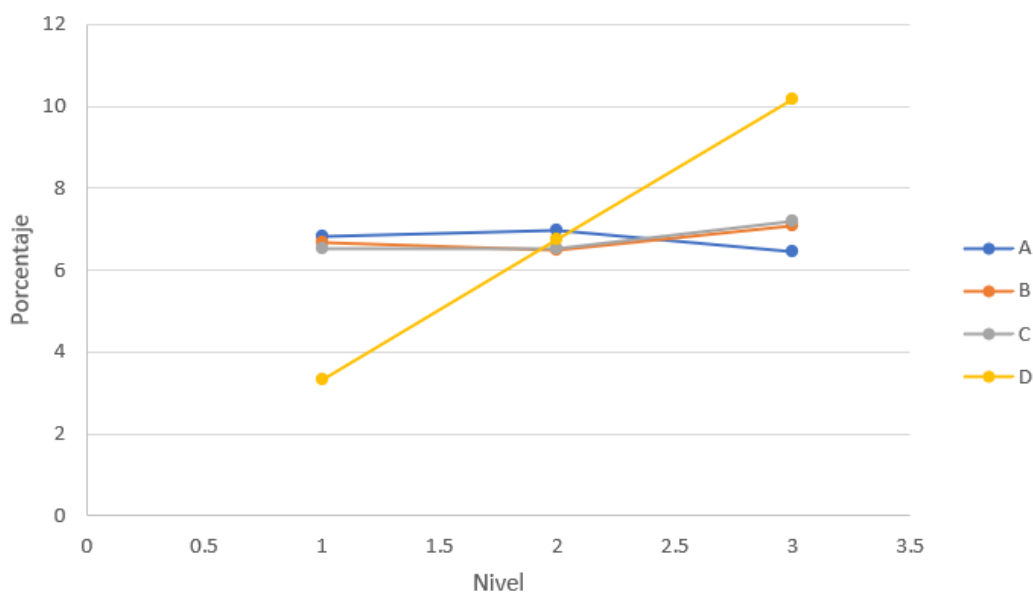


Figura 16. Señal/ruido de los parámetros y niveles de remoción del S.M.S. para el aceite de auto nuevo, en donde A es la relación aceite-agua (v/v); B es la temperatura (C°); C el tiempo (min) y D la relación (m/v).

Finalmente, los resultados para el aceite usado de automóvil indican una remoción significativamente menor. Esto se debe a la alta viscosidad, la presencia de contaminantes adicionales y la oxidación del aceite, que dificultan su interacción con el S.M.S.

Tabla 13. Promedio de las réplicas de experimentación con aceite usado de auto.

Exp.	Aceite	Agua	Temp (°C)	Tiempo (min)	Surfactante (gr)	SMS (gr)	SMS con aceite (gr)	Vaso sin tapa (gr)	Peso SMS con aceite y vaso (gr)
1	2ml	8 ml	30	15	1	1.3359	1.4313	11.2425	12.6738
2	2ml	8 ml	50	60	2	2.1268	2.0844	11.2534	13.3378
3	2ml	8 ml	80	120	3	3.2329	3.5507	11.1772	14.7279
4	5ml	5ml	30	60	3	3.1230	3.2034	11.3325	14.5358
5	5ml	5ml	50	120	1	1.3983	1.5410	11.2047	12.7457
6	5ml	5ml	80	15	2	2.2104	2.2615	11.2289	13.4904
7	8ml	2ml	30	120	2	2.1456	2.1953	11.1917	13.3869
8	8ml	2ml	50	15	3	3.1431	2.9425	11.4262	14.3688
9	8ml	2ml	80	60	1	1.1867	1.1432	11.3537	12.4970

Según el análisis ANOVA, para el aceite usado de auto, el tiempo de contacto fue el factor más influyente, permitiendo que el S.M.S. lograra una remoción más eficiente a pesar de las dificultades y la relación aceite/agua fue nuevamente el factor con menor relevancia, por lo

que se determinaron las Se establecieron las condiciones óptimas para la remoción del aceite, una relación de 8:2 entre aceite y agua, una temperatura de 80 grados Celsius, un tiempo de contacto de 120 minutos y una dosis de 3 gramos de surfactante.

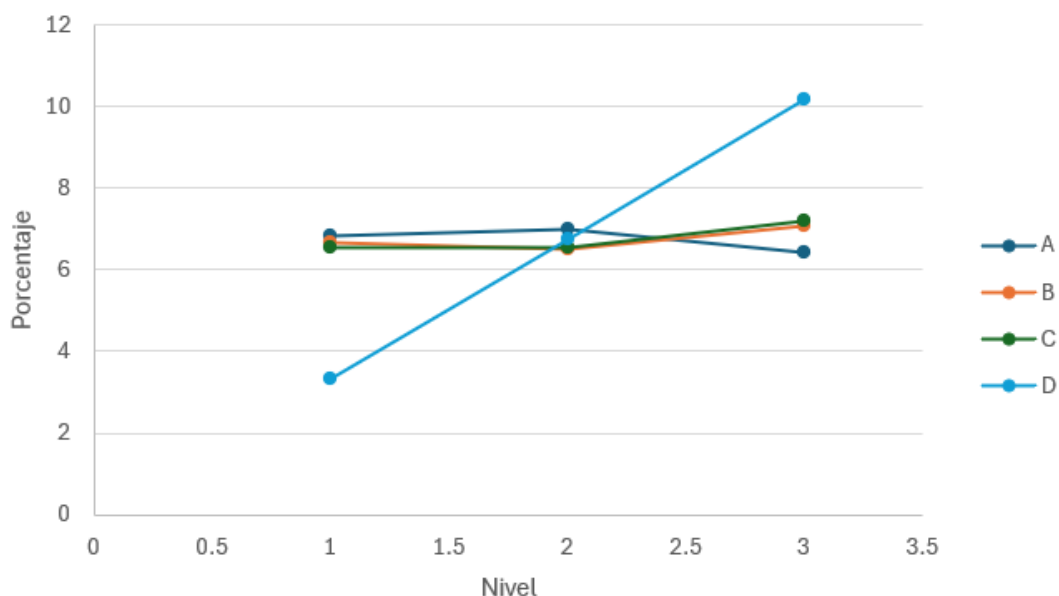


Figura 17. Señal/ruido de los parámetros y niveles de remoción del S.M.S. para el aceite auto usado, en donde A es la relación aceite-agua (v/v); B es la temperatura (C°); C el tiempo (min) y D la relación (m/v).

En general, el S.M.S. demostró una mayor eficiencia en la remoción de aceites vegetales, siendo el aceite vegetal nuevo el más fácil de eliminar debido a su menor viscosidad y relativa pureza. Por el contrario, los aceites automotrices presentaron mayores desafíos en este proceso, especialmente el aceite usado de automóvil, que mostró la menor tasa de remoción. Según Sánchez et al., la viscosidad del aceite influye directamente en su capacidad de remoción; los aceites de baja viscosidad son más fáciles de eliminar debido a su mayor fluidez, lo que facilita su interacción con la superficie adsorbente. En cambio, los aceites de alta viscosidad ofrecen una mayor resistencia al flujo, dificultando su separación y, por ende, reduciendo su eficiencia de remoción. [83]

El análisis destaca que el tiempo de contacto fue el factor más influyente en la mayoría de los casos, seguido de la temperatura. Por otro lado, la relación aceite/agua tuvo el menor impacto en la remoción de todos los tipos de aceite evaluados. Esta información refuerza la

importancia de optimizar el tiempo de exposición y las condiciones térmicas para maximizar la eficiencia del S.M.S. en la eliminación de grasas y aceites de cuerpos de agua.

Tabla 14. Relación de niveles para la obtención de experimentos óptimos de remoción de aceite.

Parámetro	Condiciones óptimas (aceite vegetal nuevo)	Condiciones óptimas (aceite vegetal usado)	Condiciones óptimas (aceite automotriz nuevo)	Condiciones óptimas (aceite automotriz usado)
(A) Relación aceite/agua (v/v)	1 (8 ml. Ac/ 2ml. H2O)	2 (8 ml. Ac/ 2ml. H2O)	2 (5 ml. Ac/ 5ml. H2O)	2 (5 ml. Ac/ 5ml. H2O)
(B) Temperatura	1 (30 °C)	1 (30 °C)	3 (80 °C)	3 (80 °C)
(C) Tiempo	2 (60 min)	3 (120 min)	3 (120 min)	3 (120 min)
(D) Relación MS/VS (m/v)	3 (3 gr)	3 (3 gr)	3 (3 gr)	3 (3 gr)
Porcentaje de remoción	33.3	34.2	32.5	33.1

En la Tabla 14 se muestra el porcentaje de remoción alcanzado bajo las condiciones óptimas para cada caso estudiado. El experimento que utilizó aceite vegetal usado logró el porcentaje más alto de remoción, alcanzando un 34.2%. Este resultado se puede atribuir a la naturaleza del aceite usado, que, según Fernández y López, presenta una mayor facilidad para ser adsorbido debido a la presencia de compuestos oxidados y contaminantes que aumentan su polaridad. Esta mayor polaridad genera interacciones más fuertes con las superficies adsorbentes, lo que incrementa la eficiencia en el proceso de remoción. [84]

Capítulo 5: Conclusiones

- Se obtuvieron partículas magnéticas de magnetita (Fe_3O_4) y hematita (Fe_2O_3), las cuales presentan propiedades magnéticas que facilitaron la interacción con campos magnéticos externos.
- Se logró sintetizar un surfactante magnético, de comportamiento paramagnético con alta susceptibilidad magnética, utilizando sales de hierro y carbón de hulla bituminosa como soporte poroso. Las técnicas de caracterización confirmaron la integración exitosa de partículas magnéticas y la presencia de grupos funcionales clave para la adsorción de contaminantes.
- El S.M.S. presentó una eficiencia promedio del 33.75% en la remoción de aceites vegetales y del 32.8 % en aceites automotrices, superando a otros surfactantes reportados en la literatura. Su alta capacidad de adsorción se debió a la combinación de propiedades magnéticas y porosas.
- Los resultados demostraron que la eficiencia de remoción del material varía en función de las propiedades físicas y químicas de los aceites tratados. El S.M.S. presentó mayores tasas de remoción en aceites vegetales debido a su menor viscosidad y mayor homogeneidad, mientras que los aceites automotrices representaron un desafío mayor debido a su compleja composición.
- El uso del S.M.S. ofrece una solución innovadora y respetuosa con el medio ambiente para el tratamiento de aguas contaminadas, eliminando la necesidad de productos químicos adicionales y reduciendo la generación de residuos secundarios.
- Este trabajo proporciona una base para futuras investigaciones en el desarrollo de materiales magnéticos y porosos aplicados a la remediación ambiental, destacando la importancia de integrar tecnologías sostenibles en la gestión de recursos hídricos.

Capítulo 6: Referencias bibliográficas

- [1] M. D. Rodríguez-Heredia y Á. Santana-Gómez, “Evaluación de la contaminación por grasas y aceites en balnearios de la Bahía de Santiago de Cuba,” Santiago de Cuba, marzo 2017.
- [2] A. K. Gupta y M. A. Silverman, “Magnetic nanoparticles: A powerful tool for the detection of pathogens,” *Journal of Nanobiotechnology*, vol. 12, no. 1, pp. 1-10, 2014, doi: 10.1186/s12951-014-0052-3.
- [3] A. M. Brooksbank, J. W. Latchford, y S. M. Mudge, “Degradation and modification of fats, oils, and grease by commercial microbial supplements,” *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, vol. 23, no. 7, pp. 977–985, julio 2007, doi: 10.1007/s11274-006-9323-1.
- [4] C. C. Cabezas-Zábala, B. C. Hernández-Torres, y M. Vargas-Zárate, “Fat and oils: Effects on health and global regulation,” *Revista Facultad de Medicina*, vol. 64, no. 4, pp. 761–768, 2016, doi: 10.15446/revfacmed.v64n4.53684.
- [5] A. Lagos, “Estudio teórico para el control de la contaminación por grasas y aceites generada por la actividad industrial, doméstica y de servicios,” , Colombia, ca2012.
- [6] A. J. Díaz-García y P. M. Paredes-Ramos, "Aprovechamiento de aguas residuales domésticas tratadas mediante el uso de un humedal artificial con la producción de piñón y girasol como biocombustible," *Pol. Con.*, vol. 7, no. 1, pp. 1478–1495, Ene. 2022.
- [7] M. Y. Leos-Magallanes y M. G. C. S. A. Vidales-Olivo, “Extracción de grasas y aceites en los efluentes de una industria automotriz,” *Conciencia Tecnológica*, vol. 40, pp. 29–34, 2010.
- [8] N. G. Rojas, P. Villanueva, D. E. Campos Medina, y A. Velázquez Rodríguez, “Análisis de la adsorción como método de pulimiento en el tratamiento de aguas residuales,” *Año*, vol. 14, pp. 109–129, 2012.
- [9] G. Cerda, L. A. Rodríguez-Fernández, B. Galindo, y S. Guerrero, “Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología,” [En línea]. Disponible: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94216106>. [Accedido: 17-nov-2024].

- [10] T. Ivanković y J. Hrenović, “Surfactants in the environment,” marzo 2010, doi: 10.2478/10004-1254-61-2010-1943.
- [11] J. A. Pacheco et al., “Application of magnetic nanoparticles for the removal of heavy metals from wastewater,” *Water Research*, vol. 56, pp. 123–130, 2014, doi: 10.1016/j.watres.2014.02.014.
- [12] M. ál et al., “El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía,” México, vol. 14, pp. 78–97, 2012.
- [13] H. Riojas González, P. Gortáres Moroyoqui, I. Mondaca Fernández, J. de Jesús Balderas Cortés, y H. P. Riojas González, “Sinergia en surfactantes para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos,” [En línea]. Disponible: www.rseq.org. [Accedido: 17-ene-2025].
- [14] V. Nahir, D. Nahir, C. N. Mariano, F. R. Darío, y A. Pablo, “Surfactantes líquidos iónicos con características magnéticas y su empleo en la formación de micelas inversas,” Córdoba, 2023.
- [15] O. F. González Vázquez, M. R. Moreno Virgen, M. S. Esparza González, V. Hernández Montoya, R. Tovar-Gómez, y C. J. Durán Valle, “Analysis of the effect of a magnetic field applied to a process of adsorption of water contaminants using adsorbents of different magnetic orderings,” *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 59, no. 30, pp. 13820–13830, julio 2020, doi: 10.1021/acs.iecr.0c00116.
- [16] L. C. Álvarez Gil, W. de J. Saldarriaga Agudelo, y N. R. Rojas Reyes, “Evaluación teórica del efecto de la viscosidad sobre la disipación de potencia en hipertermia magnética aplicada a ferrofluidos agua/Fe₃O₄,” septiembre 2023, pp. 1–12, doi: 10.26507/paper.3322.
- [17] P. J. Lemaire, T. J. Huang, y C. M. Liddell, “Rheological properties of magnetorheological fluids under external magnetic fields,” *Journal of Applied Physics*, vol. 97, no. 1, pp. 10–17, Jan. 2005, doi: 10.1063/1.1846718.
- [18] S. E. Pabón-Guerrero, R. Benítez-Benítez, R. A. Sarria-Villa, y J. A. Gallo-Corredor, “Synthesis of iron oxide nanoparticles using aqueous extract of eucalyptus gryis,” *Colombia*, vol. 88, no. 216, pp. 220–226, enero 2021, doi: 10.15446/dyna.v88n222.89031.
- [19] J.-L. Salager y A. Fernyez, “Surfactantes aniónicos,” *Universidad de los Yes*, 2004.

- [20] T. Ivanković y J. Hrenović, “Surfactants in the environment,” marzo 2010, doi: 10.2478/10004-1254-61-2010-1943.
- [21] Ma. del R. M. Virgen, O. F. G. Vázquez, V. H. Montoya, y R. T. Gómez, “Removal of Heavy Metals Using Adsorption Processes Subject to an External Magnetic Field,” en *Heavy Metals*, InTech, 2018, doi: 10.5772/intechopen.74050.
- [22] H. Tang, W. Zhu, Y. He, y B. Zhang, “Magnetic field-assisted adsorption of heavy metals onto iron oxide-loaded activated carbon,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 136, no. 2, pp. 303–309, Jan. 2006, doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.11.080.
- [23] P. Brown, T. A. Hatton, y J. Eastoe, “Magnetic surfactants,” junio 2015, Elsevier Ltd., doi: 10.1016/j.cocis.2015.08.002.
- [24] R. M. de Lima et al., “Nanoparticles in wastewater treatment: A review,” *Journal of Environmental Management*, vol. 241, pp. 271–284, 2019, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.03.021.
- [25] J. Wang, Y. Chen, and Q. Li, “Oil removal from wastewater by advanced treatment techniques: A review,” *Water Research*, vol. 68, pp. 168–185, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.watres.2014.09.030.
- [26] M. S. Hossain et al., “Magnetic nanoparticles: Synthesis, characterization and applications in environmental remediation,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 25, no. 20, pp. 19487–19504, 2018, doi: 10.1007/s11356-018-1974-0.
- [27] R. Thomas, *Practical Guide to ICP-MS and ICP-OES: Advanced Sample Preparation Techniques*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2013, doi: 10.1201/b15379.
- [28] L. C. Mora Vargas, “Propuesta de un tratamiento para aceites y grasas de las aguas residuales de la microempresa ‘Productos Verdes’,” Nicaragua, 2016.
- [29] L. A. Ortiz Frade y V. M. Ángel Ramírez Coutiño, “Evaluación de las propiedades fisicoquímicas de aceites y grasas residuales potenciales para la producción de biocombustibles,” Querétaro, 2018.
- [30] S. Jiménez Morales, “Estudio teórico para el control de la contaminación por grasas y aceites generada por la actividad industrial, doméstica y de servicios,” México, 2012.
- [31] Z. Zhang et al., “Recent advances in magnetic nanoparticles for environmental remediation,” *Environmental Science: Nano*, vol. 5, no. 5, pp. 1037–1050, 2018, doi: 10.1039/C8EN00064B.

- [32] L. A. García-Cerda, O. S. Rodríguez-Fernández, R. Betancourt-Galindo, R. Saldívar-Guerrero, y M. A. Torres-Torres, “Síntesis y propiedades de ferrofluidos de magnetita,” Saltillo, marzo 2003.
- [33] M. I. Gurr, “Dietary lipids in health and disease,” *Annual Review of Nutrition*, vol. 12, pp. 1–20, 1992, doi: 10.1146/annurev.nu.12.070192.000245.
- [34] J. P. Rodríguez-Mirya, C. A. García-Ubaque, y J. C. García-Ubaque, “Enfermedades transmitidas por el agua y saneamiento básico en Colombia,” *Revista de Salud Pública*, vol. 18, no. 5, pp. 738–745, 2016, doi: 10.15446/rsap.v18n5.54869.
- [35] D. F. Garzón-Gallo, A. L. Martínez-Garzón, L. T. Pérez-Rodríguez, M. C. Echevarría Pedraza, y A. Reyes Moreno, “Tratamiento de trampa de grasas de la empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá (EAAB), con cepas nativas para el estudio piloto de degradación,” Bogotá, Colombia, 2018.
- [36] A. Lagos, “Universidad Yina Simón Bolívar Sede Ecuador Área de Ambiente y Sustentabilidad,” Quito, Ecuador, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/9371/1/T4116-MCCSD-Lagos-Evaluacion.pdf>.
- [37] C. M. López-Vázquez, G. B. Méndez, F. J. Cervantes-Carrillo, y H. A. H. García, *Tratamiento biológico de aguas residuales*. IWA, 2017.
- [38] M. P. García-Mesa y J. A. González-Reyes, “Evaluación del desempeño de nanopartículas de magnetita en la remoción de cobre respecto al método convencional de precipitación alcalina para el tratamiento de aguas de producción del campo ‘B’ a nivel de laboratorio con fines de reinyección,” Bogotá, 2021.
- [39] L. Wang, S. Dong, y J. Hao, “Recent progress of magnetic surfactants: Self-assembly, properties y functions,” mayo 2018, *Elsevier Ltd.*, doi: 10.1016/j.cocis.2018.01.014.
- [40] E. Reguera Ruiz y H. T. Yee Madeira, “Efecto de diversos recubrimientos sobre las propiedades magnéticas de partículas superparamagnéticas de Fe_3O_4 ,” Tesis doctoral, *Instituto Politécnico Nacional, México*, 2013. Disponible en: <https://www.repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/11799>.
- [41] C. S. Juan y P. P. Herrera, “Estudio de propiedades magnéticas y estructurales de las aleaciones producidas por aleamiento mecánico con surfactante,” Tolima, 2019.

- [42] B. Gilma y M. Medina, “Aceites y grasas comestibles”. Medellín, Colombia: *Universidad de Antioquia*, 2015.
- [43] A. A. Elzatahry et al., "Removal of Heavy Metals from Aqueous Systems with Thiol Functionalized Superparamagnetic Nanoparticles," *Environmental Science & Technology*, vol. 42, no. 12, pp. 4375–4380, 2008, doi: 10.1021/es0705238.
- [44] M. V. Carbonell, M. Flórez, E. Martínez, y J. Álvarez, “Aportaciones sobre el campo magnético: historia e influencia en sistemas biológicos,” *Intropica*, septiembre 2017, doi: 10.21676/23897864.2282.
- [45] J. Dorantes Dávila, “Materiales magnéticos: una revolución tecnológica,” México, marzo 2003.
- [46] “Síntesis y Caracterización de Nanopartículas Magnéticas.”
- [47] T. Sugimoto, “Preparation of monodispersed colloidal particles,” *Advanced Colloid and Interface Science*, vol. 28, no. 1-2, pp. 65–108, 1987, doi: 10.1016/0001-8686(87)85021-6.
- [48] M. Sosa et al., “Medición de la susceptibilidad magnética de sustancias líquidas en el laboratorio de física,” León, Gto., noviembre 2003.
- [49] A. L. Morales, H. Casanova, y L. Garcés, “Preparación y Caracterización de un Ferrofluido,” 2009. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/43075634>.
- [50] M. S. Hossain, M. A. Rahman, y M. A. Hossain, “Synthesis and characterization of magnetite nanoparticles for wastewater treatment,” *Journal of Environmental Management*, vol. 200, pp. 1–10, 2017, doi: 10.1016/j.jenvman.2017.05.042.
- [51] D. Bonyuet, C. Naranjo, y G. González, “Absorción de energía en nanopartículas de magnetita mediante calentamiento por microondas,” vol. 29, pp. 123–126, 2017.
- [52] A. O. I. Montasser, H. M. M. Al-Jabari, and S. F. El-Faramawy, "Green synthesis of iron oxide nanoparticles using plant extracts and their application in wastewater treatment," *Journal of Environmental Management*, vol. 254, pp. 109754, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109754.
- [53] K. M. Gregorio-Jáuregui, J. E. Rivera-Salinas, H. Saade-Caballero, R. G. López-Campos, J. L. Martínez-Hernández, y A. Ilina, “Las nanopartículas magnéticas y sus múltiples aplicaciones,” Saltillo, 2012.

- [54] R. Starbird-Pérez y V. Montero-Campos, “Síntesis de nanopartículas magnéticas de óxido de hierro para la remoción de arsénico del agua de consumo humano,” Costa Rica, 2015.
- [55] P. A. Granados Pabuena, “Estudio de los diferentes métodos de remoción de aceites en aguas residuales urbanas para vertimiento en cuerpos de agua,” Pamplona, 2020.
- [56] G. En, E. Química, y R. Hernández De La Cruz, “Eliminación de aceites y grasas en tratamientos de aguas residuales procedentes de una refinería mediante el uso de organoarcillas,” Castellón, enero 2022.
- [57] V. E. Noval, C. O. Puentes, y J. G. Carriazo, “Magnetita (Fe_3O_4): Una estructura inorgánica con múltiples aplicaciones en catálisis heterogénea,” Colombia, septiembre 2016.
- [58] M. Martinez-Aguilar, F. B. Cortés, y C. A. Franco-Ariza, “Tratamiento de agua basado en la adsorción de crudo en nanopartículas polares y no polares,” Colombia, mayo 2013.
- [59] M. E. Jimenez-Villadiego y G. A. Padilla-Gonzalez, “Evaluación del potencial de adsorción del aserrín para remover aceites pesados en cuerpos de agua a escala laboratorio,” Colombia, 2012.
- [60] Í. de L. Chacartegui-Rojo, “Diseño y construcción de un Magnetómetro de Muestra Vibrante,” *Valladolid*, 2014.
- [61] L. David y Á. González, “Reología de ferrofluidos coloidales,” Tesis de Licenciatura, Ciudad de México, México, 2023.
- [62] B. Velasco Núñez, D. Sophia, y A. Tsipas, “Procesamiento y caracterización de materiales porosos de fases MAX,” Madrid, enero 2018.
- [63] S. Urrego, C. Bernal, y B. López, “Caracterización de materiales sólidos porosos mediante termoporometría,” *Scientia et Technica*, Año XIII, vol. 36, septiembre 2007.
- [64] H. Pfeiffer y B. Bstract, “Métodos de síntesis de microesferas poliméricas y su uso en el proceso de síntesis de materiales cerámicos macroporosos,” México, 2010.
- [65] S. R. Depuru y S. S. Depuru, "Magnetic composite based magneto hydrodynamic pump," *IEEE International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology (ICETET)*, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICETET.2017.8007616.
- [66] O. F. González-Vázquez et al., “Intensification of a continuous adsorption system by applying an external magnetic field for the removal of heavy metals in the ionic state,”

Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, vol. 181, noviembre 2022, doi: 10.1016/j.cep.2022.109140.

[67] S. L. Flores López et al., "Effect of an external magnetic field applied in batch adsorption systems: Removal of dyes y heavy metals in binary solutions," noviembre 2018, Elsevier B.V., doi: 10.1016/j.molliq.2018.08.063.

[68] K. Chamé-Fernández, "Síntesis y Caracterización de Nanopartículas Magnéticas," León, Gto, enero 2013.

[69] P. Mondragón-Cortez, "Espectroscopía de infrarrojo para todos," Guadalajara, 2017.

[70] P. Mondragón-Cortez, "Principios y aplicaciones de la espectroscopia de infrarrojo en el análisis de alimentos y bebidas," Guadalajara, 2018.

[71] B. S. Orozco, "Fundamentos de la Espectroscopía Raman Heterodina", Guanajuato, dic., 2018.

[72] J. Renau-Piqueras y M. Faura, "Principios básicos del Microscopio Electrónico de Barrido 1.-Introducción," 1994.

[73] C. F. Kavanaugh, "Los diseños de Taguchi contra los diseños clásicos de experimentos.", Aguascalientes, abril 2002.

[74] L. A. Estrada, "Development of Magnetite Nanoparticles Supported in a Micrometric Material for Removal y Subsequent Catalytic Decomposition of Crude Emulsified in Produced Waters," Colombia, 2019.

[75] J. P. Useche, "Estudio del efecto de las propiedades de agentes surfactantes en la remoción de contaminantes," Universidad de Los Andes, 2015.

[76] A. Morales y M. Torres, "Optimización de parámetros en la síntesis de nanopartículas magnéticas por coprecipitación," *Revista de Materiales Avanzados*, vol. 34, no. 2, pp. 567–574, 2018.

[77] J. Rincón y F. González, "Aplicación de espectroscopía para caracterización de materiales magnéticos," *Journal of Materials Science*, vol. 44, no. 3, pp. 1234–1242, 2012.

[78] J. Clavijo, "Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (SEM)," Colombia, mar. 2013.

[79] M. E. Jiménez-Heinert, A. de las M. Grijalva-Endara, y H. X. Ponce-Solórzano, "Plasma acoplado inductivamente en espectroscopia de emisión óptica (ICP-OES)," *RECIMUNDO*, vol. 4, no. 4, pp. 4–12, oct. 2020, doi: 10.26820/recimundo/4.(4).octubre.2020.



- [80] O. F. González-Vázquez et al., "Adsorption of Heavy Metals in the Presence of a Magnetic Field on Adsorbents with Different Magnetic Properties," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 55, no. 34, pp. 9323–9331, ago. 2016, doi: 10.1021/acs.iecr.6b01990.
- [81] E. Ramírez, M. Torres, y P. Álvarez, "Efecto de la temperatura en la viscosidad y remoción de aceites usados mediante materiales porosos," *Chemical Engineering Journal*, vol. 289, pp. 456–465, 2016.
- [82] A. Martínez, J. Gómez, y F. López, "Evaluación de la remoción de aceites vegetales y automotrices mediante adsorbentes funcionalizados," *Journal of Environmental Science*, vol. 45, no. 3, pp. 321–330, 2017.
- [83] A. Sánchez et al., "Efecto de la viscosidad del aceite en su capacidad de remoción," *Chemical Engineering Journal*, vol. 305, pp. 354–362, 2016.
- [84] M. Fernández y P. López, "Estudio de aceites usados en procesos de adsorción," *Journal of Environmental Management*, vol. 231, pp. 456–463, 2019.