

Tratamiento del agua de producción de un campo petrolero sometido al recobro químico con surfactantes aniónicos mediante el uso de carbones activados en condiciones dinámicas.

Henry Manuel Contreras Contreras y Camilo Andrés Amador López

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero de Petróleos

Director

Adan Yovani León Bermúdez

Doctor en Ingeniería Química

Codirectores

Daniel Ricardo Molina Velasco

Doctor en Química

Darío Yesid Peña Ballesteros

Doctor en Corrosión

Sergio Fernando Castellanos Amador

Magister en Ingeniería de Hidrocarburos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingeniería Físicoquímicas

Escuela de ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

A dios principalmente por permitirme llegar hasta este punto de mi vida.

A mis padres Edgar Amador y Luz Dary López, por su apoyo en mis decisiones y proyectos durante toda mi carrera y mi vida.

A mi hermana María Alejandra, por ser mi motor de vida.

A mis abuelos Rosaura Serrano y Pedro Vicente López que partió antes de ver este sueño cumplido, hoy más que nunca te doy las gracias por enseñarme todo lo que pudiste.

A la gloriosa Universidad Industrial de Santander por estos años en los cuales me presento a personas que son parte de mi vida, Silvia Zapata por guiarme dentro y fuera de la universidad y Henry Contreras por aceptar este reto y acompañarme en todo momento.

Camilo Amador

Dedicatoria

Agradecer principalmente a Dios por brindarme la sabiduría, la fortaleza y la tenacidad para poder cumplir con mi meta, la cual es un pequeño eslabón de un engranaje aún más grande que me depara la vida, un destino con muchos retos, pero sobre todo con muchas bendiciones.

A mi madre hermosa por todo el esfuerzo, por las noches de desvelo, por todos esos sacrificios que realizó para que no me faltara absolutamente nada sin importar las carencias propias. Agradecerle por siempre contar con un plato de comida caliente, por nunca haberme faltado un abrazo o un “te quiero hijo”. Gracias a ella por todos los valores inculcados desde niño, por enseñarme a ser primero una persona integra y con mucho valor moral, que sin importar las circunstancias debemos dar lo mejor de sí, sin esperar recibir recompensa alguna, siendo así la mayor enseñanza que me ha regalado, gracias a todo eso, estoy justo aquí.

A mis familiares, mis hermanos menores los cuales son una parte de ese motor que me motiva a seguir adelante en la vida, mis amigos de infancia los cuales creyeron en mi desde el principio y siempre me apoyaron, a los compañeros que pude conocer gracias a la gloriosa Universidad Industrial de Santander y me brindaron su ayuda, su conocimiento, su amistad y momentos de mucha alegría.

Quiero dar las gracias a ciertas personas de las cuales pude aprender muchas cosas en el ámbito académico y personal, Juan José Villamizar por enseñarme el compromiso, la disciplina y la responsabilidad, Bryan Rodríguez por enseñarme la lealtad y el valor de la palabra, Iván Amado

por enseñarme el valor de los pequeños momentos de la vida, Idaly Rico por enseñarme lo incondicional que puede ser una persona y lo valioso de una amistad real, Laura Rivera por enseñarme la resiliencia y todo lo bueno que nos puede brindar la vida después de los momentos oscuros. A todos aquellos que no nombre pero que hacen parte de mi vida, a mi capítulo estudiantil (ACEIP) que me abrieron las puertas y me brindaron lo mejor y en el cual pude conocer grandes seres humanos y futuros profesionales, gracias por todo a mi segunda familia.

Por último y no menos importante, agradecer a todas las personas que por distintos motivos de la vida ya no hacen parte de la mía, pero ayudaron en mi crecimiento personal aportando experiencias buenas y malas, las cuales tuvieron gran impacto en mi vida, gracias a los amigos que ya no están, a los amores que fueron y para aquellos que nos olvidaron. Gracias.

Henry Manuel Contreras

Agradecimientos

El autor de este trabajo expresa agradecimientos a:

- El doctor Adan León.
- La Escuela de ingeniería de Petróleos por el respaldo académico.
- El Grupo de Investigación de Corrosión (GIC), por el apoyo técnico y el acceso a las instalaciones del laboratorio.
- El profesional Andrey Jiménez por su acompañamiento.
- El profesional Sergio Castellanos por la orientación.
- La Universidad Industrial de Santander por brindar el espacio y los recursos institucionales.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	16
1. Objetivos.....	18
1.1. Objetivo General.....	18
1.2. Objetivos Específicos.....	18
2. Marco teórico	19
2.1. Aguas de Producción	19
2.1.1. Caracterización de aguas de producción.....	20
2.1.2. Tratamiento de aguas de producción	21
2.2. Carbones activados a base de cuesco de palma	23
2.2.1. Carbón activado	23
2.2.2. Adsorción de surfactantes mediante uso de carbones activados.....	24
2.3. Fenómenos de sorción.....	25
2.3.1. Adsorción.....	25
2.3.2. Absorción.....	25
2.4. Isotermas de adsorción.....	26
2.4.1. Método BET y su importancia en el análisis de adsorción.....	26
2.4.1.1. Isotermas de fisisorción	26
2.5. Modelos de isotermas de adsorción	28

2.5.1. Modelo de Freundlich.....	28
2.5.2. Modelo de Langmuir.....	28
2.5.3. Modelo de Temkin.....	29
2.6. Efectos ambientales del dodecilmecanosulfonato de sodio (SDBS)	30
2.7. Eliminación del dodecilmecanosulfonato de sodio (SDBS) en aguas de producción para reutilización.....	31
2.8. Normativa y regulaciones ambientales	31
3. Metodología	32
3.1. Síntesis de carbones activados a partir de biomasa residual.....	32
3.1.1. Síntesis de carbones activados	33
3.1.2. Impregnación	33
3.1.3. Pirólisis	34
3.1.3.1. Activación.....	35
3.1.4. Lavado.....	38
3.2. Sistema experimental para un proceso de adsorción	38
3.3. Espectroscopia UV-Vis.....	40
3.3.1. Equipo	41
3.3.2. Procedimiento	42
3.3.2.1. Solución salina sintética (Salmuera base).....	42
3.3.2.2. Solución sintética de surfactante (salmuera base y SDBS)	42
3.3.2.3. Curva de calibración UV-VIS.....	43

4. Análisis de resultados	44
4.1. Área superficial de los carbones activados (Pruebas BET)	44
4.2. Resultados de adsorción.....	45
4.2.1. Prueba A.....	45
4.2.2. Prueba B.....	49
4.2.3. Prueba C.....	52
4.2.4. Prueba D.....	55
4.2.5. Prueba E.....	57
4.3. Ciclos de lavado.....	59
4.4. Indicadores de desempeño en la remoción de SDBS a partir de carbones activados	60
4.4.1. Análisis de la eficiencia de remoción de SDBS frente a ciclos de regeneración (desorción)	60
4.4.2. Análisis de la eficiencia de remoción de SDBS frente a variables operacionales	62
4.5. Efecto de las variables de un proceso usando análisis estadístico	64
4.5.1. Modelo remoción al tiempo de ruptura (Remoción_TR)	66
4.5.2. Modelo Remoción al tiempo de saturación (Remoción_TS).....	67
4.6. Construcción de isothermas de adsorción.....	69
5. Discusión.....	72
6. Conclusiones.....	73
7. Recomendaciones	75

Referencias Bibliográficas 76

Apéndices..... 81

Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Componentes principales y su concentración en aguas de producción</i>	20
Tabla 2. <i>Isotermas de fisisorción</i>	26
Tabla 3. <i>Parámetros operacionales en proceso de pirólisis</i>	36
Tabla 4. <i>Parámetros iniciales asociados al proceso de pirólisis</i>	37
Tabla 5. <i>Parámetros finales asociados al proceso de pirólisis</i>	37
Tabla 6. <i>Variables operacionales en proceso de adsorción dinámica</i>	40
Tabla 7. <i>Disolución de sales inorgánicas de alta pureza (salmuera base)</i>	42
Tabla 8. <i>Puntos característicos para curva de calibración</i>	43
Tabla 9. <i>Área superficial de los carbones activado</i>	45
Tabla 10. <i>Evaluación de la capacidad de remoción y pérdida de eficiencia post-lavado del carbón activado (prueba A, B y C)</i>	61
Tabla 11. <i>Evaluación de la eficiencia de remoción frente a variaciones operacionales (prueba D y E)</i>	63
Tabla 12. <i>Análisis de Varianza (ANOVA) para la remoción en el punto de ruptura</i>	66
Tabla 13. <i>Análisis de Varianza (ANOVA) para la remoción en el punto de saturación</i>	67
Tabla 14. <i>Análisis de la concentración en equilibrio y masa adsorbida mediante a través del uso de carbones activados</i>	69
Tabla 15. <i>Linealización del SDBS mediante modelos de adsorción</i>	70

Lista de Figuras

Figura 1. <i>Esquema de diseño experimental para síntesis de carbón activado</i>	33
Figura 2. <i>Muestra de cuesco de palma africana (100 g)</i>	34
Figura 3. <i>Esquema integral del pirolizador</i>	35
Figura 4. <i>Gráfica de temperatura en función del tiempo a 480 °C</i>	35
Figura 5. <i>Equipo de filtración por vacío</i>	38
Figura 6. <i>Sistema experimental de adsorción en flujo continuo</i>	39
Figura 7. <i>Espectrofotómetro UV-Vis Thermo Scientific GENESYS 180 de doble haz</i>	41
Figura 8. <i>Curva de calibración UV-VIS</i>	44
Figura 9. <i>Prueba A (concentración vs volumen)</i>	46
Figura 10. <i>Prueba A (remoción vs volumen)</i>	47
Figura 11. <i>Prueba A desorción (concentración vs Volumen)</i>	48
Figura 12. <i>Prueba B (concentración vs volumen)</i>	49
Figura 13. <i>Prueba B (remoción vs volumen)</i>	51
Figura 14. <i>Prueba B desorción (concentración vs volumen)</i>	51
Figura 15. <i>Prueba C (concentración vs volumen)</i>	52
Figura 16. <i>Prueba C (remoción vs volumen)</i>	54
Figura 17. <i>Prueba C desorción (concentración vs volumen)</i>	54
Figura 18. <i>Prueba D (concentración vs volumen)</i>	55
Figura 19. <i>Prueba D (remoción vs volumen)</i>	56
Figura 20. <i>Prueba D (concentración vs volumen)</i>	58
Figura 21. <i>Prueba E (concentración vs volumen)</i>	59

Figura 22. <i>Ciclo de lavado (A,B y C)</i>	60
Figura 23. <i>Análisis gráfico de la capacidad de remoción y pérdida de eficiencia post-lavado del carbón activado (prueba A,B y C)</i>	62
Figura 24. <i>Análisis gráfico de la eficiencia del carbón activado frente a variaciones operacionales (prueba D y E)</i>	64
Figura 25. <i>Matriz de gráficos de dispersión</i>	65
Figura 26. <i>Isoterma de adsorción no linealizada.</i>	70
Figura 27. <i>Modelo de Freundlich (isoterma linealizada).</i>	71
Figura 28. <i>Modelo de Langmuir (isoterma linealizada).</i>	71
Figura 29. <i>Modelo de Temkin (isoterma linealizada).</i>	72

Lista de Apéndices

Apéndice A <i>Cálculo de la masa total alimentada</i>	81
Apéndice B <i>Cálculo de la masa escapada</i>	82
Apéndice C <i>Cálculo de la masa adsorbida</i>	82
Apéndice D <i>Cálculo del porcentaje de eficiencia acumulada</i>	82
Apéndice E <i>Cálculo de la eficiencia volumétrica temprana</i>	83
Apéndice F <i>Cálculo de la eficiencia volumétrica total</i>	83
Apéndice G <i>Cálculo de la eficiencia global</i>	83
Apéndice H <i>Cálculo de la pérdida de eficiencia post-lavado</i>	84
Apéndice I <i>Cálculo de la zona de transferencia de masa</i>	84
Apéndice J <i>Espectros de adsorbancia UV-VIS a diferentes concentraciones de SDBS (curva de calibración)</i>	85

Resumen

Título: Tratamiento del agua de producción de un campo petrolero sometido al recobro químico con surfactantes aniónicos mediante el uso de carbones activados en condiciones dinámicas *

Autor: Henry Manuel Contreras Contreras, Camilo Andrés Amador López**

Palabras Clave: Aguas de producción, SDBS (dodecilbencenosulfonato de sodio), Carbón activado, Adsorción, UV-VIS

Descripción: Los métodos de recobro mejorado (EOR) con surfactantes aniónicos como el dodecilbencenosulfonato de sodio (SDBS) generan una gran cantidad de aguas de producción con una carga orgánica presente, con un desafío ambiental y operativo al momento de un tratamiento eficiente. La investigación evaluó la remoción del SDBS en condiciones dinámicas en una columna de lecho empacado, usando carbón activado, sintetizado a partir de biomasa residual (cuesco de nuez de palma africana), mediante impregnación de ácido fosfórico, (relación 1:8) y una pirólisis a 480 °C y 30 min. Se evaluó el efecto del caudal (4,5 y 9 ml/min), la altura del lecho adsorbente (3,5 y 7 cm) y el análisis del efecto que producen los ciclos de lavado sobre la eficiencia de adsorción. Se cuantificó las concentraciones por espectrofotometría UV-VIS para cada una de las pruebas realizadas, y se demostró que la mejor condición operacional (caudal 4,5 ml/min, y tamaño de lecho 7 cm) logró una eficiencia en la remoción global >99% y un volumen tratado hasta alcanzar saturación de 2130 ml. Por otra parte, los ciclos de lavado redujeron significativamente la capacidad del adsorbente, con una pérdida presente en la eficiencia de remoción del 64% tras dos ciclos de lavado (desorción). En las isotermas de adsorción, el modelo de Temkin presentó el mejor ajuste ($R^2 = 0,999$), lo cual indica una disminución gradual de la energía de adsorción del lecho adsorbente. Se concluye que el carbón activado sintetizado a partir de cuesco de nuez de palma africana es efectivo en condiciones dinámicas de adsorción. Sin embargo, se requiere de métodos alternativos de regeneración para su futura regeneración y reúso.

* Trabajo de Grado

** Facultad de ingeniería Físicoquímicas. Escuela de ingeniería de Petróleos. Director: Adan Yovani León Bermúdez. Doctor en Ingeniería Química. Codirectores: Daniel Ricardo Molina Velasco. Doctor en Química, Darío Yesid Peña Ballesteros. Doctor en Corrosión, Sergio Fernando Castellanos Amador. Magister en Ingeniería de Hidrocarburos.

Abstract

Title: Treatment of production water from an oil field undergoing chemical recovery with anionic surfactants using activated carbons under dynamic conditions *

Author: Henry Manuel Contreras Contreras, Camilo Andrés Amador López**

Key Words: Produced water, SDBS (sodium dodecylbenzenesulfonate), Activated carbon, Adsorption, UV-VIS

Description: Enhanced oil recovery (EOR) methods with anionic surfactants such as sodium dodecylbenzenesulfonate (SDBS) generate a large amount of produced water with a high organic load, presenting an environmental and operational challenge when seeking efficient treatment. This research evaluated the removal of SDBS under dynamic conditions in a packed bed column, using activated carbon synthesized from residual biomass (African palm kernel shell) through phosphoric acid impregnation (1:8 ratio) and pyrolysis at 480 °C for 30 minutes. The effect of flow rate (4.5 and 9 mL/min), adsorbent bed height (3.5 and 7 cm), and the analysis of the effect of washing cycles on adsorption efficiency were evaluated. Concentrations were quantified by UV-VIS spectrophotometry for each of the tests carried out, and it was demonstrated that the best operational condition (flow rate 4.5 mL/min / bed height 7 cm) achieved an overall removal efficiency >99% and a treated volume until saturation of 2130 mL. On the other hand, washing cycles drastically reduced the adsorbent capacity, with a loss in removal efficiency of 64% after two washing (desorption) cycles. In the adsorption isotherms, the Temkin model presented the best fit ($R^2 = 0.999$), indicating a gradual decrease in the adsorption energy of the adsorbent bed. It is concluded that activated carbon synthesized from African palm kernel shell is effective under dynamic adsorption conditions; however, much more effective alternative regeneration methods are required for its future regeneration and reuse.

* Degree Work

** Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Director: Adan Yovani León Bermúdez, Doctorate in Chemical Engineering. Co-directors: Daniel Ricardo Molina Velasco, Doctorate in Chemistry; Darío Yesid Peña Ballesteros, PhD in Corrosion; Sergio Fernando Castellanos Amador, Master in Hydrocarbon Engineering.

Introducción

La industria petrolera se enfrenta a uno de sus mayores desafíos, maximizar la recuperación de hidrocarburos en campos maduros. Debido al constante crecimiento exponencial en el consumo energético a nivel mundial, se ha impulsado la implementación de técnicas de recobro mejorado (EOR) entre las cuales se encuentra la inyección de surfactantes químicos como el dodecilbencenosulfonato de sodio (SDBS), el cual es un surfactante aniónico biodegradable el cual puede representar un riesgo ambiental si se dispone de manera inadecuada en aguas superficiales. Estudios previos han indicado que los métodos tradicionales de tratamiento fisicoquímico son insuficientes para la correcta remoción de dicha fracción orgánica disuelta en este tipo de efluentes.

Aunque la adsorción mediante carbón activado se postula como una alternativa prometedora, la mayoría de sus investigaciones se han centrado en sistemas estáticos (batch), los cuales no reflejan fielmente las condiciones reales de flujo continuo requeridas en una planta de tratamiento industrial.

Así, el objeto de estudio de la investigación es la remoción de surfactantes aniónicos en aguas de producción obtenidas de procesos de recobro químico, a partir del uso de carbón activado como material adsorbente en condiciones dinámicas (columnas de lecho empacado). Por tanto, la investigación tiene como objetivo responder la siguiente pregunta de investigación: ¿cuál es la eficiencia de eliminación de surfactantes aniónicos y capacidad de adsorción del carbón activado en un sistema de flujo dinámico? En consecuencia, el objetivo principal es la evaluación del comportamiento y de la eficiencia del carbón activado para tratamiento de esas aguas en condiciones dinámicas, bajo la hipótesis de que la configuración del sistema en lecho empacado

superaría porcentajes de eliminación del 90 % . (León et al., 2023), ya que mejora el tiempo de contacto y el nivel de saturación del adsorbente, en comparación a los sistemas estáticos. Para responder a esta pregunta, se utilizó un enfoque cuantitativo y experimental, fundamentado en los principios de la transferencia de masa. Se diseñó y evaluó un dispositivo de lecho empacado a escala de laboratorio para simular el comportamiento hidrodinámico real, analizando algunas variables críticas como el tiempo de residencia, la velocidad superficial y la concentración inicial del surfactante para determinar los parámetros de diseño del lecho y las curvas de ruptura.

La realización de este proyecto es muy importante para mitigar el impacto ambiental negativo generado por una disposición inadecuada de aguas con alta carga química. Desde el punto de vista técnico-práctico este estudio ofrece parámetros de diseño fiables para implementar sistemas de adsorción a escala industrial y para el tratamiento eficiente de efluentes complejos. Social y ambientalmente, el beneficio directo sería la reducción de la contaminación de los cuerpos de agua receptores, a favor de la protección de los ecosistemas locales y de la salud de las comunidades de las áreas adyacentes a los campos petroleros.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Tratamiento del agua de producción de un campo petrolero sometido al recobro químico con surfactantes aniónicos mediante el uso de carbones activados en condiciones dinámicas.

1.2 Objetivos Específicos

Sintetizar carbones activados a partir de biomasa residual vegetal preseleccionada para la adsorción de surfactantes aniónicos presentes en las aguas de producción en condiciones dinámicas.

Seleccionar variables y parámetros operacionales para un proceso de adsorción dinámica mediante el uso de carbones activados a partir de biomasa residual vegetal preseleccionada.

Realizar pruebas de adsorción dinámicas a escala laboratorio empleando carbones activados a partir de biomasa residual vegetal preseleccionada bajo las condiciones establecidas.

Determinar la eficiencia del carbón activado a partir de biomasa residual vegetal preseleccionada en la remoción de surfactantes aniónicos presentes en las aguas de producción mediante isotermas de adsorción.

2. Marco teórico

2.1 Aguas de Producción

Se conoce que, a cierta profundidad de la superficie terrestre en donde se encuentre rocas con excelente porosidad, generalmente están llenas de algún fluido en el cual predomina el agua, lugar predilecto para el entrapamiento de los hidrocarburos después de su formación y posterior desplazamiento. El agua de producción denominada también como aguas de formación o salmueras, siendo un elemento vital en la explotación petrolera en yacimientos convencionales y no convencionales de crudo y gas debido a la inyección de agua como método de recobro para aumentar la producción en los pozos, especialmente en los campos maduros los cuales con el tiempo van perdiendo gradualmente la presión natural de yacimiento, al implementar este método de recuperación secundaria se mantiene o se restablece la presión necesaria para una recuperación óptima del crudo.

Sabiendo que el agua es un fluido que se relaciona a las acumulaciones de petróleo, su composición varia por las características fisicoquímicas del yacimiento en cuando a al ambiente geológico en el que se encuentren, por lo que se dispone de un amplio análisis que permita identificar las características del agua, las cuales pueden depender de la composición química, la temperatura, pH, gravedad específica, presión y temperatura, sin dejar de lado la presencia de sólidos disueltos, sólidos suspendidos, bacterias, aceite residual o gases. (Landinez, 2020)

Estas aguas deben cumplir con un tratamiento específico y una disposición final, no obstante, la normativa ambiental colombiana la cual está relacionada con respecto a las alternativas

de tratamiento las mismas se encuentra muy descentralizada, presentando muchos vacíos legales (Naranjo-Fernández, D. 2022)

2.1.1 Caracterización de aguas de producción

Las aguas de producción asociadas a la extracción de petróleo y gas contienen diversos componentes que pueden representar un riesgo ambiental significativo si no se manejan adecuadamente (Veil, Puder, & Elcock). Los principales componentes se encuentran se indican en la Tabla 1.

Tabla 1

Componentes principales y su concentración en aguas de producción

Parámetro	Concentración (mg/l)	Parámetro	Concentración (mg/l)
Parámetros principales		Metales	
COD	1220-2600	Na	0-150.000
TSS	1,2-1000	Sr	0-6250
TOC	0-1500	Zn	0,01-35
TDS	100-400.000	Li	0,038-64
ácidos orgánicos totales	0,001-10000	Al	0,4-410
Químicos de tratamiento de producción		As	0,002-11
Glicol	7,7-2000	Ba	0-850
Inhibidores de corrosión	0,3-10	Cr	0,002-1,1
Inhibidores de arcillas	0,2-30	Fe	0,1-1100
BTEX		Mn	0,004-175

Benceno	0,032-778,51	K	24-4300
Etilbencina	0,026-399,84	Pd	0,008-0,88
Tolueno	0,058-5,86	Ti	0,01-0,7
Xileno	0,01-1,29	Otros iones	
Total, BTEX	0,73-24,1	B	5-95
Otros contaminantes		Ca ²⁺	0-74.000
Hidrocarburos saturados	17-30	SO ₄ ²⁻	0-15.000
Grasas y aceites totales	2-560	Mg ²⁺	0,9-6000
Fenol	0,001-10.000	HCO ₃ ⁻	0-15.000
		Cl ⁻	0-270.000

Nota: Componentes principales y su concentración encontrados en aguas de producción. Tomado de. Al-Ghouti, Al-Kaabi, Ashfaq, & Da'na. (2019)

La composición detallada de estas aguas de producción puede variar ampliamente dependiendo de varios factores como la ubicación geográfica, edad geológica, profundidad y geoquímica del yacimiento, así como la composición química de las fases de petróleo y gas presentes. Además, los productos químicos utilizados durante los procesos de producción también pueden influir en la composición final del agua. (Al-Ghouti, Al-Kaabi, Ashfaq, & Da'na, 2019).

2.1.2 Tratamiento de aguas de producción

Es una necesidad crítica en la industria petrolera el tratamiento de aguas residuales debido a los grandes volúmenes que se generan durante los procesos de extracción y debido a la complejidad de su composición, la cual incluye hidrocarburos, sales, sólidos suspendidos y

compuestos orgánicos e inorgánicos que pueden ser tóxicos o interferir con operaciones posteriores si no se eliminan adecuadamente (Ojo Samuel et al., 2022).

Han sido desarrolladas diversas tecnologías y posteriormente evaluadas para tratar este tipo de efluentes, tales como procesos fisicoquímicos tradicionales (separación por fases, adsorción con carbón activado), sistemas a base de membranas con principio de ultrafiltración y ósmosis inversa, los cuales presentan ventajas y limitaciones según las condiciones y objetivos de tratamiento (Amakiri et al., 2022; Abdelhamid et al., 2025).

El principal desafío por tomar radica en la naturaleza recalcitrante de los compuestos orgánicos que se encuentran disueltos y la estabilidad que se presenta en emulsiones generadas por agentes químicos (surfactantes), los cuales no pueden ser removidos de manera convencional como es el caso de separadores API o unidades de flotación por aire disuelto (DAF). En contexto, la adsorción mediante carbón activado se ha posicionado como una de las tecnologías de tratamiento avanzado (BAT) más eficientes; (Méndez-Díaz, 2008) sostiene que este material garantiza la remoción selectiva de tensoactivos aniónicos como el SDBS gracias a su alta porosidad y afinidad hidrofóbica. La implementación a escala industrial de estos sistemas en condiciones dinámicas es crucial para el escalamiento en el tratamiento de aguas de producción, y con predicciones basadas en curvas de ruptura, se estima la vida útil del lecho adsorbente y así garantizar que el efluente cumpla con los límites de vertimiento establecidos en marcos regulatorios en Colombia, facilitando una transición hacia modelos de economía sostenible mediante la reutilización del agua.

2.2 Carbones activados a base de cuesco de palma

El uso de cuesco de cuesco de palma de aceite (*Elaeis guineensis*) como generador de carbón activado es una de las estrategias de economía circular más potentes de Colombia, dado a su gran producción de aceite de palma, siendo el cuarto productor mundial y el primero en América Latina (Communications, BBVA, 2025), con una producción durante el 2024 de 1,72 millones de toneladas.

El cuesco es un residuo lignocelulósico de alta densidad y dureza que, a diferencia de otras biomásas, esta posee una estructura celular rica en lignina (aprox. 45-50%) aportando propiedades únicas tras la carbonización. Su resistencia mecánica es crucial para condiciones dinámicas (columnas de lecho empacado) debido a su resistencia a la presión de flujo y así evitando la generación de finos que podrían taponar el sistema. El desarrollo de microporosidad cumple un papel fundamental gracias a su estructura natural la cual facilita la creación de poros de tamaño inferior a 2 nm, ideales para la adsorción de moléculas orgánicas pequeñas y medianas como el SDBS.

2.2.1 Carbón activado

La versatilidad como agente absorbente del carbón activado reside gracias a su compleja estructura porosa y una química superficial rica en grupos funcionales oxigenados, tales como fenoles, carboxilos y quinonas, los cuales actúan como sitios altamente activos para la retención de contaminantes mediante mecanismos de interacción molecular (Asimbaya et al., 2025). La capacidad de remoción está relacionada directamente con el origen biológico de la materia prima utilizada, dicho esto, surge la necesidad de conocer el material con las mejores propiedades para la creación de dicho carbón.

El aprovechamiento de biomásas residuales tales como la cáscara de cacao, los desechos de piña y el cuesco de palma permite la síntesis de materiales con áreas superficiales que superan los 900 m²/g demostrando así una eficacia superior al 90% en la eliminación de colorantes como el azul de metileno (C₁₆ H₁₈ Cl N₃ S) y la rodamina B (C₂₈ H₃₁ Cl N₂ O₃). El cuesco de palma sobresale por su alta densidad y excelente resistencia mecánica, lo que facilita su modificación con agentes químicos como el cloruro de zinc (ZnCl₂), el ácido sulfúrico (H₂SO₄) o el ácido fosfórico (H₃PO₄), e incluso con óxidos de hierro (Fe/PKS-AC) para mejorar la selectividad y estabilidad del material tras múltiples ciclos de uso (Jun et al., 2021).

También se ha documentado la remoción de metales pesados como (Pb²⁺, Cd²⁺, Zn²⁺, Cr⁶⁺, Ni²⁺ y Cu²⁺), sales inorgánicas (nitratos, fosfatos, amonio), surfactantes y tensoactivos (SDBS, SDS) y contaminantes orgánicos (fenoles, benceno, aromáticos y pesticidas).

2.2.2 Adsorción de surfactantes mediante uso de carbones activados

La adsorción de surfactantes, más concretamente el dodecilsulfonato de sodio (SDBS), se fundamenta en la afinidad hidrofóbica y la estructura porosa compleja que posee el carbón activado, reconociendo de manera eficiente el proceso para la remoción selectiva de tensoactivos aniónicos. Estudios muestran que el carbón sintetizado a partir de cuesco de palma africana genera estructuras mesoporosas con un tamaño de poro que ronda el promedio cercano a 3 nm, lo cual es ideal para una fácil difusión de moléculas, en este caso, el SDBS dentro de la matriz del material.

Análisis de caracterización textual indican que, cumpliendo condiciones óptimas de activación (relación de impregnación equivalente a 1,8 y 400 °C de temperatura), el área superficial (BET) del material valores altos, los cuales pueden favorecer directamente la interacción del adsorbato con los sitios activos, maximizando la eficiencia en el proceso de remoción de los surfactantes aniónicos.

2.3 Fenómenos de sorción

Se conoce como sorción al proceso de retención o captura de contaminantes presentes en algún líquido o gas, ocurre principalmente en materiales porosos, como el carbón activado. Dicho proceso cuenta con dos mecanismos principales; adsorción y absorción.

2.3.1 Adsorción

La adsorción es el proceso en el cual un sólido poroso (carbón activado) es capaz de retener partículas de un fluido a nivel microscópico en su superficie, al entrar en contacto con este. El absorbente cuenta con un número finito de “sitios activos”, siendo cada uno capaz de retener una molécula. La adsorción es un proceso dinámico y a medida que el tiempo de contacto avanza, la velocidad de adsorción disminuye debido a que la superficie comienza a saturarse, hasta alcanzar un equilibrio. (González & Escobar, 2022).

2.3.2 Absorción

La absorción es el proceso donde los átomos, moléculas o iones de un solvente se introducen y se esparcen en el absorbente, generando variaciones físicas como cambio de

coloración, cambios dimensionales e incluso la migración de compuestos solubles (Vega Quispe, N. G., 2019).

2.4 Isotermas de adsorción

A partir de modelos matemáticos que describen el comportamiento y distribución de fluidos en medios porosos, es posible establecer la relación entre la cantidad de soluto adsorbido y la concentración del adsorbato en fase líquida estable. (Kalam et al., 2021).

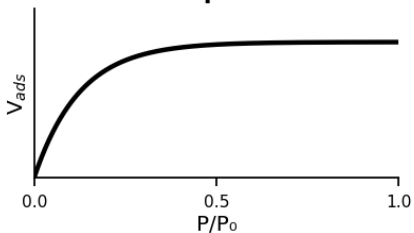
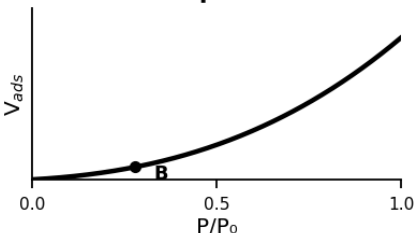
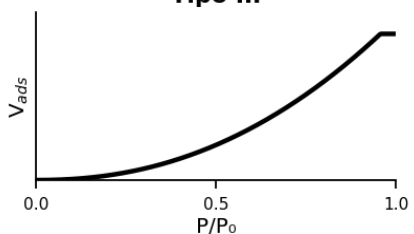
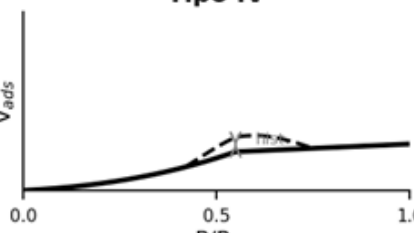
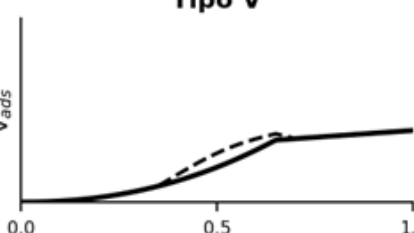
2.4.1 Método BET y su importancia en el análisis de adsorción

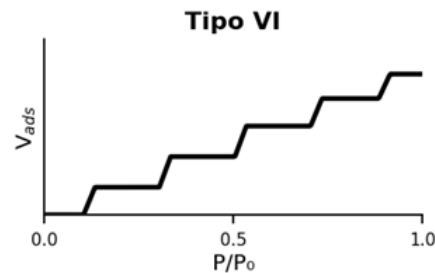
El método BET (Brunauer-Emmett-Teller, 1938) es el modelo estándar para determinar el área superficial de materiales sólidos además de sus propiedades texturales. Dicho método asume las moléculas de gas que pueden acumularse en capas, lo cual permite cuantificar el área superficial de sólidos (principalmente porosos) basado en la interpretación de isotermas de adsorción.

2.4.1.1 Isotermas de fisisorción. La IUPAC (Unión Internacional de Química Pura y Aplicada) propone la clasificación de las isotermas de fisisorción, las cuales se agrupan en seis tipos, representadas en la Tabla 2.

Tabla 2

Isotermas de fisisorción

Tipo	Isoterma	Descripción	Porosidad
Tipo I	<p style="text-align: center;">Tipo I</p> 	<p>Adsorción en microporos. Satura rápidamente con meseta horizontal. Modelo de Langmuir.</p>	<p>Microporos</p>
Tipo II	<p style="text-align: center;">Tipo II</p> 	<p>Sólidos no porosos o macroporosos. Punto B indica monocapa completa. Modelo BET.</p>	<p>Macroporos / No poroso</p>
Tipo III	<p style="text-align: center;">Tipo III</p> 	<p>Interacciones sorbato-sorbato dominantes. Adsorción débil inicial. Poco común.</p>	<p>No poroso</p>
Tipo IV	<p style="text-align: center;">Tipo IV</p> 	<p>Mesoporos con condensación capilar. Presenta bucle de histéresis. Análisis BJH.</p>	<p>Mesoporos</p>
Tipo V	<p style="text-align: center;">Tipo V</p> 	<p>Similar a Tipo III con histéresis. Sorbente-sorbato débil en mesoporos hidrofóbicos.</p>	<p>Mesoporos</p>

Tipo VI

Forma escalonada. Adsorción capa por capa en superficies homogéneas.

No poroso (uniforme)

Nota: Las gráficas muestran el volumen adsorbido (V_{ads}) en función de la presión relativa (P/P_0). Las líneas discontinuas en los tipos IV y V representan la rama de desorción (histéresis). Adaptado de Sing et al. (1985) y Thommes et al. (2015).

2.5 Modelos de isotermas de adsorción

2.5.1 Modelo de Freundlich

Este modelo se fundamenta en la adsorción multicapa en una superficie heterogénea con energía uniforme (Akhtar, 2015) y se considera como la primera y mejor ecuación de una isoterma empírica, la cual está dada en la ecuación 1.

$$\text{Log } Q_e = \text{Log } K_F + \frac{1}{n} \text{Log } (C_e) \quad (1)$$

Donde:

- (Q_e) Concentración en equilibrio del adsorbato en fase adsorbida [mg/g]
- (C_e) Concentración en equilibrio del adsorbato en fase líquida [mg/L]
- (K_F) Constante empírica que se obtiene a partir de la pendiente y la intersección de $\text{Log } C_e$ vs $\text{Log } Q_e$
- (n) Constante empírica que se obtiene a partir de la pendiente y la intersección de $\text{Log } C_e$ vs $\text{Log } Q_e$

2.5.2 Modelo de Langmuir

Según Clarkson et al. (1997), la relación empírica de Langmuir se describe en la ecuación 2.

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{1}{Q_{max}K_L} + \frac{C_e}{Q_{max}} \quad (2)$$

Donde:

- (Ce) Concentración en equilibrio del adsorbato en fase líquida [mg/L]
- (Qe) Concentración en equilibrio del adsorbato en fase adsorbida [mg/g]
- (Qmax) Capacidad máxima de adsorción correspondiente de la monocapa [mg/g]
- (KL) Constante de Langmuir (relacionada con la energía de adsorción)

Además, un valor importante en la isoterma de Langmuir es la presión a la cual se ha adsorbido la mitad de la capacidad máxima de adsorción V_L , y se denomina la presión de Langmuir P_L . El modelo de Langmuir asume que existe un estado de equilibrio dinámico (a temperatura y presión constantes) entre las especies adsorbidas y no adsorbidas, y que la adsorción se restringe a una sola capa (quimisorción). Además, supone que la superficie adsorbente es homogénea energéticamente (Murillo et al., 2015).

2.5.3 Modelo de Temkin

El modelo asume que la energía de adsorción disminuye de manera gradual (lineal) a medida que la cobertura superficial aumenta, esto ocurre debido a la consideración de efectos indirectos al momento de la interacción de las moléculas adsorbidas con la superficie del adsorbente. Entre tanto, la concentración en equilibrio del adsorbato en fase adsorbida se puede representar con la ecuación 3.

$$Q_e = n_T \ln(K_T) + n_T \ln(C_e) \quad (3)$$

Donde:

- (Q_e) Concentración en equilibrio del adsorbato en fase adsorbida [mg/g]
- (C_e) Concentración en equilibrio del adsorbato en fase líquida [mg/L]
- (K_T) Constante empírica obtenida a través de la exponencial del punto de intersección
- (n) Constante empírica obtenida a través de la pendiente

2.6 Efectos ambientales del dodecilsulfonato de sodio (SDBS)

El SDBS es un surfactante aniónico con un uso frecuente en recobro mejorado (EOR) debido a sus características, como la reducción de la tensión interfacial entre el crudo y el agua, no obstante, la presencia de dicho compuesto representa un riesgo ambiental significativo sin el tratamiento y disposición adecuada.

Estudios previos indican la interacción del SDBS con organismos acuáticos, lo que representa un peligro latente, debido a una alteración en la permeabilidad de las membranas celulares, lo que produce una pérdida de la homeostasis osmótica, como consecuencia, se genera citólisis (ruptura de la célula por exceso de presión, producto de una ósmosis excesiva), también genera una pérdida de agua hacia el exterior, lo que lleva a una deshidratación celular (plasmólisis).

El dodecilsulfonato de sodio es un surfactante “biodegradable”, aun así, se presenta una acumulación en el ambiente cuando las concentraciones son demasiado elevadas. También se puede presentar bioacumulación cuando las condiciones de degradación no son las adecuadas (temperatura, pH, oxígeno disuelto, entre otras).

En cuanto a los efectos que tiene el SDBS con respecto a la agricultura, dicho compuesto altera las propiedades fisicoquímicas del suelo agrícola. Sawadogo et al., 2014 evaluó el impacto del detergente doméstico (con presencia de tensoactivos aniónicos) a tres concentraciones diferentes: de 0,1 g/L, 1,0 g/L y 5,0 g/L. El estudio se basó en el cultivo de lechugas y quimbombó en un ambiente cerrado (macetas), las plantas de quimbombó regadas con agua destilada y una concentración del detergente (5,0 g/L) murieron en 20 días, en cuanto a las lechugas murieron a los 12 días. El estudio concluyó que concentraciones por encima de 1,0 g/L de detergente, inhibe el crecimiento de las plantas y genera posteriormente la muerte.

2.7 Eliminación del dodecilsulfonato de sodio (SDBS) en aguas de producción para reutilización.

La eliminación de surfactantes aniónicos con carbones activados representa una alternativa costo-beneficio para el tratamiento de aguas de producción, el SDBS es un contaminante persistente que ayuda en la emulsificación del crudo, lo que genera problemas al momento de su extracción, separación, transporte y almacenamiento, siendo un requisito primordial la eliminación del surfactante para la reutilización del efluente. El uso de cascara de nuez de palma africana como biomasa para la síntesis de carbones activados, puede ser una alternativa en la reducción de costos en los tratamientos y generar un impacto ambiental menor, gracias a la reutilización del efluente en procesos de reinyección o en aplicaciones agrícolas.

2.8 Normativa y regulaciones ambientales

En Colombia la resolución 0631 de 2015 establece el límite máximo para vertimiento de aguas de producción en cuerpos hídricos, regulado la presencia de los tensoactivos mediante el

análisis de azul de metileno (SAAM), el cual establece una concentración máxima de 2 mg/L (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS], 2015). En otras partes del mundo, como el caso de estados unidos, la EPA (agencia de protección ambiental) establece una concentración máxima de tensoactivos/detergentes de 0,5 mg/L. Debido a las concentraciones máximas permitidas, surge la necesidad de métodos de remoción del SDBS con porcentajes superiores al 99%, para el cumplimiento ambiental y estándares internacionales de vertimiento (Feng et al., 2022).

3. Metodología

3.1 Síntesis de carbones activados a partir de biomasa residual

Para la obtención de carbón activado a base de hueso de nuez de palma africana mediante síntesis, a partir de variables preestablecidas que abarcan la relación de impregnación, temperatura y tiempo.

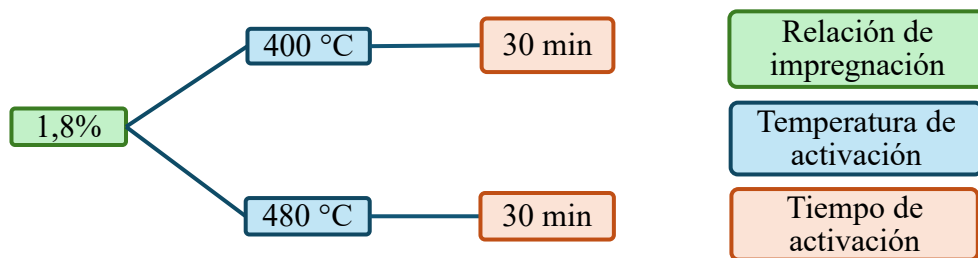
Para la selección en la relación de impregnación, se tuvo en cuenta la impregnación del 0% hasta el 0,5% como medida de verificación experimental con respecto a la compatibilidad, y el efecto de una baja concentración de ácido fosfórico (H_3PO_4) en la síntesis del carbón activado. Es importante considerar que la relación de impregnación tiene un efector directo sobre el área superficial, ya que el incremento en la relación de impregnación tiene consecuencias positivas con el área superficial y, por ende, un mejor volumen poroso (Foo y Hameed, 2012), La relación de impregnación seleccionada es 1:8.

La temperatura de activación con mejor rendimiento según la literatura se encuentra dentro del rango de los 400 °C a 480 °C con un tiempo de reacción entre 30 y 60 min, con valores de área superficial $\approx 1270 \text{ m}^2/\text{g}$, con volumen poroso $\approx 0,6 \text{ cm}^3/\text{g}$, siendo valores óptimos para un proceso de adsorción adecuado.

3.1.1 Síntesis de carbones activados

Figura 1

Esquema de diseño experimental para síntesis de carbón activado



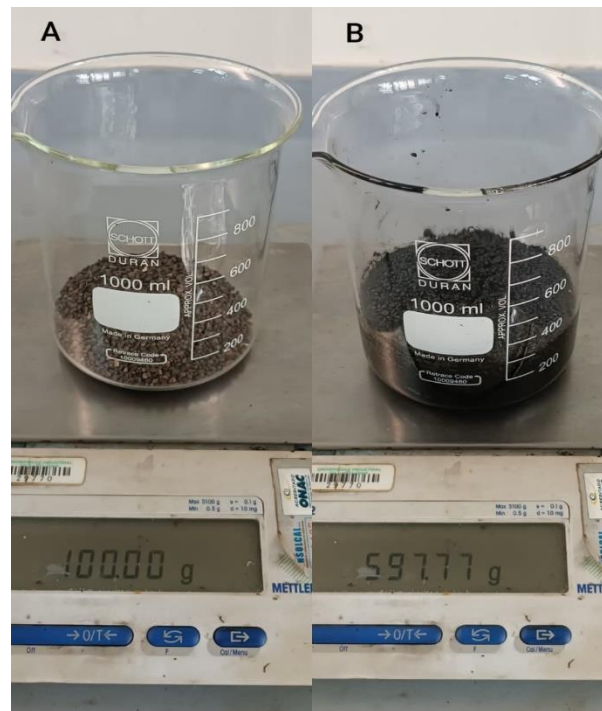
3.1.2 Impregnación

Inicialmente se pesan 100 g de cuesco de palma africana (Figura 2), posteriormente se adiciona 150 ml ácido fosfórico (H_3PO_4) y se diluye en 100 ml de agua destilada en relación 3:2, Se lleva la muestra a una temperatura de 100 °C con la ayuda de una plancha de calentamiento, al alcanzarse la temperatura deseada, se dispone de la muestra durante una (1) hora en agitación constante mediante un agitador de aspas.

Para finalizar el proceso de impregnación, se dispone la muestra en el horno durante un tiempo aproximado de 6 horas, a una temperatura de 110 °C para la eliminación de las trazas de humedad presente.

Figura 2

Muestra de cuesco de palma africana (100 g)



Nota: vista frontal de las muestras de cuesco de nuez de palma africana, la imagen “A” corresponde al cuesco base, la imagen “B” corresponde al cuesco activado químicamente.

3.1.3 Pirólisis

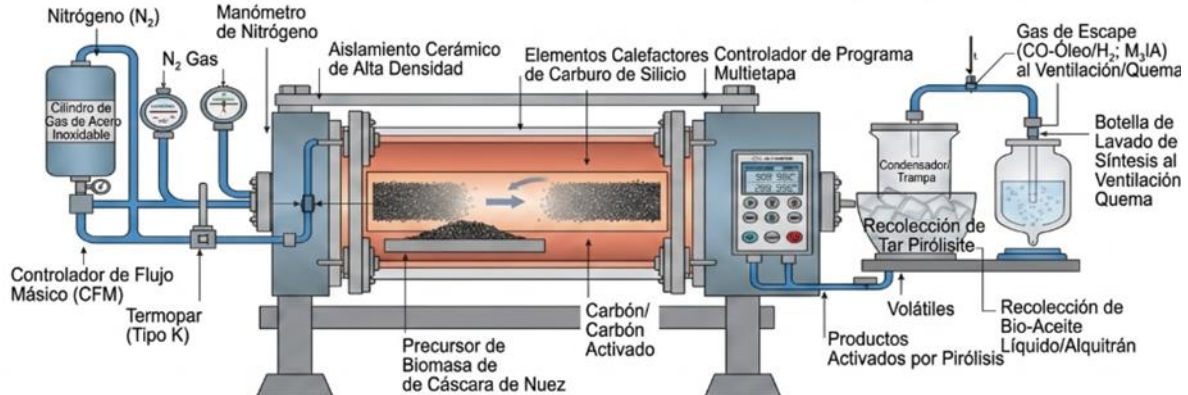
Es un proceso de descomposición o degradación térmica de materia orgánica, sin la presencia de oxígeno (atmósfera inerte), usualmente nitrógeno, a condiciones de temperaturas que oscilan entre los 300°C y 400 °C. La biomasa que está compuesta principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina, experimenta fragmentación y despolimerización.

El proceso de pirólisis cuenta con 3 procesos principales, la cuantificación y disposición de la materia prima, la modificación de la masa orgánica y la obtención y separación de residuos (Coque, bio-aceite y gas)

Se observa en la Figura 3 las principales partes que componen un pirolizador.

Figura 3

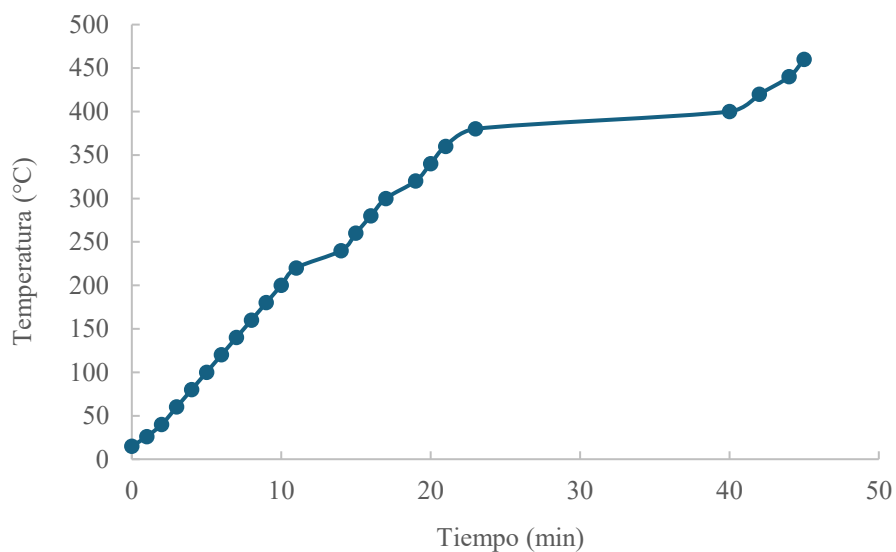
Esquema integral del pirolizador



3.1.3.1 Activación. Es fundamental variar la temperatura, iniciando desde la temperatura inicial del equipo de aproximadamente 26 °C hasta llegar a una temperatura de operación de 480 °C, tomando mediciones de tiempo cada 20 °C con respecto a la temperatura anterior. Una vez alcanzado la temperatura de operación, se dispone la muestra por 30 minutos en el pirolizador y posteriormente se enfría a temperatura ambiente.

Figura 4

Gráfica de rampa de temperatura en función del tiempo



La Figura 4 señala parámetros operacionales normales del equipo, garantizando un óptimo proceso de pirólisis.

El proceso general se realizó con las siguientes variables, valores iniciales de la muestra y elementos relacionados al proceso de pirólisis se presentan descritos en la Tabla 4

Tabla 3

Parámetros operacionales en proceso de pirólisis

Parámetro	Valor
Tiempo inicial	10:24 am
Tiempo final	11:09 am
Temperatura final	480°C
Tiempo a temperatura final	30 min
Volumen N ₂	1L/min

Nota: El tiempo inicial y final corresponde a la hora de inicio en el aumento de temperatura del equipo (pirolizador) hasta alcanzar la temperatura deseada de operación, en este caso hasta alcanzar los 480°C y el tiempo a temperatura final indican el tiempo de operación que estuvo el equipo (30 min a 480°C).

La Tabla 5 muestra los parámetros iniciales obtenidos para las condiciones planteadas anteriormente.

Tabla 4

Parámetros iniciales asociados al proceso de pirólisis

Parámetro	Valor
Peso tapa reactor	1126.60 g
Peso reactor	2628,67 g
Peso muestra	100,04 g
Peso recipiente de recolección	136,78 g

Nota: El peso del reactor es únicamente del contenedor vacío sin tapa, el peso de la muestra corresponde a la biomasa antes de ser incorporada al reactor, el recipiente de recolección hace énfasis a los vasos recolectores destinados a la toma de los condensados del proceso.

La Tabla 5 muestra los parámetros finales obtenidos para las condiciones planteadas anteriormente.

Tabla 5

Parámetros finales asociados al proceso de pirólisis

Parámetro	Valor
Peso tapa reactor	1135,62 g
Peso reactor	2625,74
Peso reactor con muestra	2725,74 g
Peso líquido pirolíticos	10,6 ml
Peso final muestra	30.31 g

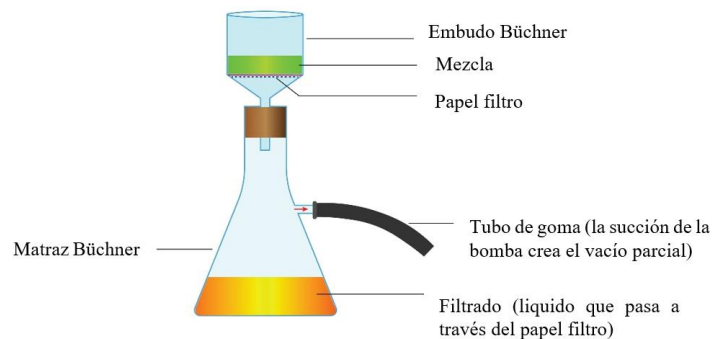
Nota: El peso del reactor es únicamente del contenedor vacío sin tapa, el peso de la muestra corresponde a la biomasa antes de ser incorporada al reactor, el recipiente de recolección hace énfasis a los vasos recolectores destinados a la toma de los condensados del proceso.

3.1.4 Lavado

Luego del proceso de pirólisis, la muestra fue lavada con agua destilada mediante un equipo de filtración por vacío (Figura 5), hasta alcanzar un pH aproximado a 7. Con este procedimiento se logró la eliminación de residuos ácidos de H_3PO_4 presentes en la superficie del carbón activado. Según Nyamful et al. (2020), las muestras presentan un pH inicial promedio de 1,2, lo cual indica la existencia de algún contaminante en la superficie del carbón activado (generalmente óxidos ácidos). Es de suma importancia la eliminación de dichos contaminantes, debido a que presentan una interferencia en los procesos de adsorción, lo que minimiza la estabilidad del material y su comportamiento como adsorbente.

Figura 5

Equipo de filtración por vacío



3.2 Sistema experimental para un proceso de adsorción

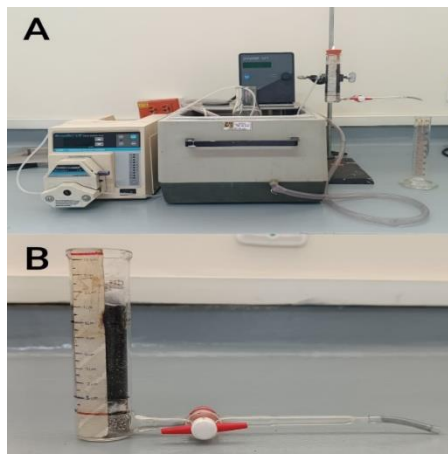
Para la determinar la eficiencia en la remoción del dodecilsulfonato de sodio (SDBS) mediante carbones activados, se realizó el montaje del sistema experimental en flujo continuo (Figura 6), el sistema consta de un baño termostático de circulación (Huber Polystat CC1), proporcionando una temperatura uniforme (65 °C), lo que permite reproducir condiciones

reales de operación, una bomba peristáltica (Masterflex L/S 7524-45) la cual impulsa un caudal controlado de la solución (base madre salina sintética + SDBS) hacia una columna de vidrio (columna de cromatografía) previamente empacada con el carbón activado que cumple de material adsorbente, retenido entre dos capas de lana de vidrio y dos mallas de aluminio para evitar cualquier pérdida del material adsorbente. El efluente tratado se dispone en una probeta de 100 ml tomando muestras de 30 ml.

Se selecciona una concentración de 2000 ppm/L de SDBS con base en la literatura especializada en recobro químico. La concentración de SDBS en inyección en campos petroleros (Llanos orientales) es de 5000 ppm, estudios como los de Soto (2019) y (Kwok et al., 1995) reportan una retención superior al 60% del surfactante en el medio poroso. Tomando la concentración recuperada de los efluentes, la cual es el 35% de la inyectada, se tiene una concentración estimada de 1750 ppm. Se establece una concentración de 2000 ppm de SDBS como valor representativo para pruebas de adsorción a escala de laboratorio.

Figura 6

Sistema experimental de adsorción en flujo continuo



Nota: Vista frontal, la imagen “A” corresponde al sistema experimental de adsorción en flujo continuo, mientras la imagen “B” corresponde al lecho empacado con carbón activado.

Se establecen variables y parámetros operacionales para el proceso de adsorción dinámica como el cambio de caudal, la altura del lecho adsorbente e incluso la implementación de ciclos de lavado (adsorción-desorción) en condiciones dinámicas (Figura 6).

Tabla 6

Variables operacionales en proceso de adsorción dinámica

Variables operacionales				
Prueba	Caudal (ml/min)	Altura lecho (cm)	Adsorción	Desorción
A	9	7	✓	✓
B	9	7	✓	✓
C	9	7	✓	✓
D	4,5	7	✓	-
E	4,5	3,5	✓	-

3.3 Espectroscopia UV-Vis

La espectroscopia UV-Vis es una técnica analítica que permite identificar y cuantificar compuestos orgánicos e inorgánicos, basada en la adsorción de radiación electromagnética, fenómeno que ocurre en las transiciones electrónicas, principalmente a estados de mayor energía. El espectrofotómetro se basa en la ley de Beer-Lambert la cual establece una relación lineal entre cantidad de luz absorbida y concentración de la sustancia, representada en la siguiente:

$$A = \varepsilon * c * l \quad (4)$$

Donde:

- (A) Absorbancia
- (ϵ) Absortividad molar, etc. Propia de cada compuesto
- (c) Concentración, [mol/L]
- (l) Longitud de celda

3.3.1 Equipo

En la Figura 7 se observa el espectrofotómetro UV-Vis Thermo Scientific GENESYS 180 ® de doble haz utilizado en este trabajo. Este dispositivo opera en los rangos del ultravioleta (190–500 nm) y visible (400–800 nm), lo cual ayuda a identificar la longitud de onda máxima ($\lambda_{\text{máx}}$) del SDBS y cuantificar la concentración residual de SDBS en las muestras correspondientes al estudio.

Figura 7

Espectrofotómetro UV-Vis Thermo Scientific GENESYS 180 de doble haz

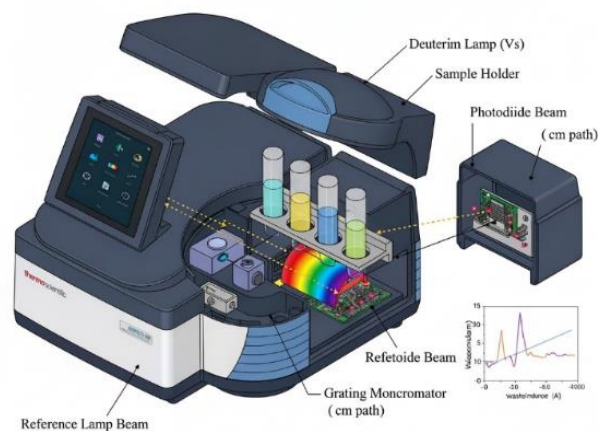


Diagrama Técnico Espectrofotómetro UV-Vis Thermo Scientific GENESYS 180
Fuente: Elaboración propia, basado en Thermo Fisher Scientific (s. f.).

3.3.2 Procedimiento

Se realizó la preparación de dos soluciones sintéticas, con el fin de simular condiciones críticas, las cuales permiten evaluar la eficiencia de adsorción por parte del carbón activado previamente sintetizado.

3.3.2.1 Solución salina sintética (Salmuera base). Se realizó la salmuera base con el fin de recrear las condiciones reales estándar del agua de producción presentes en los campos petroleros, mediante la disolución en agua destilada de sales inorgánicas de alta pureza, las cuales se encuentran representadas en la Tabla 7.

Tabla 7

Disolución de sales inorgánicas de alta pureza (salmuera base)

Compuesto	Concentración (ppm)	Concentración (g/L)
NaCl	270	0,27
NaHCO ₃	800	0,80
CaCl ₂ *H ₂ O	40	0,040

Nota: La disolución de las sales inorgánicas se realiza en agua previamente destilada, hasta completar totalmente la disolución de los compuestos, se tiene una concentración de sales totales de 1110 ppm.

3.3.2.2 Solución sintética de surfactante (salmuera base y SDBS).

Posteriormente, se realizó una preparación adicional de 1000 ml de salmuera base, en la cual se disolvió 2 g/L de dodecibencenosulfonato de sodio, generando una solución sintética que presenta una concentración de 2000 ppm de SDBS.

3.3.2.3 Curva de calibración UV-VIS. La construcción de la curva de calibración es un punto crítico de suma importancia, la cual permite una cuantificación precisa de las muestras, generando un cálculo confiable en la eficiencia de remoción. Se identificó el máximo de adsorción del SDBS mediante espectrofotometría UV, registrando una longitud de onda máxima de adsorción de 222 nm, (Zhang et al., 2018), y luego se obtuvo la curva de calibración del estudio usando soluciones con diferentes concentraciones de SDBS. La Tabla 8 indica los valores de los puntos característicos seleccionados previamente mediante muestreo, en relación de absorbancia vs concentración.

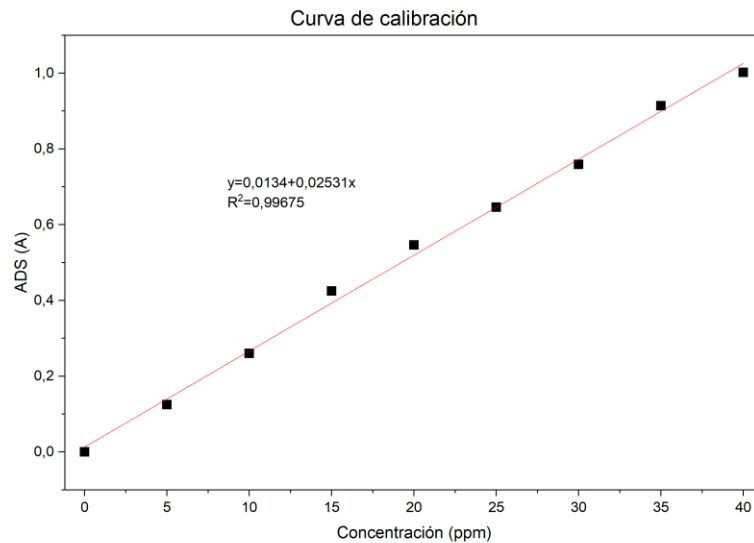
Tabla 8

Puntos característicos para curva de calibración

Concentración (ppm)	ADS (220 nm)	Concentración (ppm)	ADS (220 nm)
5	0,125	30	0,759
10	0,26	35	0,914
15	0,425	40	1,002
20	0,546	500	2,7872
25	0,646	1000	2,9051

La Figura 8 representa la gráfica de absorbancia vs concentración, observándose una tendencia lineal de los puntos característicos con un coeficiente de correlación de $R^2 = 0,99675$ lo cual indica un buen ajuste del modelo de regresión lineal, dando un 0,32 % de dispersión de datos o error entre los puntos.

La ecuación obtenida es fundamental para el cálculo de la concentración residual en las pruebas de adsorción durante los ensayos de remoción de SDBS con carbón activado.

Figura 8*Curva de calibración UV-VIS***4. Análisis de resultados****4.1 Área superficial de los carbones activados (Pruebas BET)**

Los sólidos porosos cuentan con una estructura compuesta principalmente por una matriz sólida que otorga integridad y una fase interna de espacios porosos, cuya interconexión puede variar según su origen. De acuerdo con Álvarez Merino et al. (2014) la porosidad se desarrolla mediante diversos mecanismos fisicoquímicos, como la cristalización hidrotérmica, la precipitación o la remoción de componentes. El material poroso se generó específicamente a partir del cuesco de palma africana mediante activación química.

Para determinar el área superficial específica de las muestras, se empleó el modelo matemático Brunauer-Emmett_Teller (BET), aplicando un criterio de consistencia de la transformada de Rouquerol para precisar el intervalo de aplicación. El cálculo se realizó mediante

software de medición (3FLEX V.4.03 – 3FLEXTM de Micromeritics). Los resultados presentes en la Tabla 9 revelan superficies que varían entre 1073 y 1276 m²/g, donde destacan el valor máximo en condiciones de síntesis de R1:1,8 – 480 °C – 30 min.

Tabla 9

Área superficial de los carbones activados.

Ruta de síntesis	Área superficial BET (m²/g)	Volumen poroso (cm³/g)	Diámetro medio de poro (mm)
R1:1,8 – 430 °C -30 min	1073,98	0,366	0,98
R1:1,8 – 480 °C -30 min	1274,87	0.618	1,00
R1:1,8 – 480 °C -30 min	1276,86	0,619	1,00

4.2 Resultados de adsorción

Se procede a un análisis de los datos obtenidos durante las pruebas de adsorción en columna de lecho fijo para la remoción de dodecilsulfonato de sodio (SDS), evaluando la eficiencia de remoción mediante el comportamiento de las curvas de adsorción, comparando distintas variables como volumen de caudal y altura de lecho, además de la pérdida de porcentaje de adsorción tras ciclos de lavado (desorción) para las pruebas A, B y C

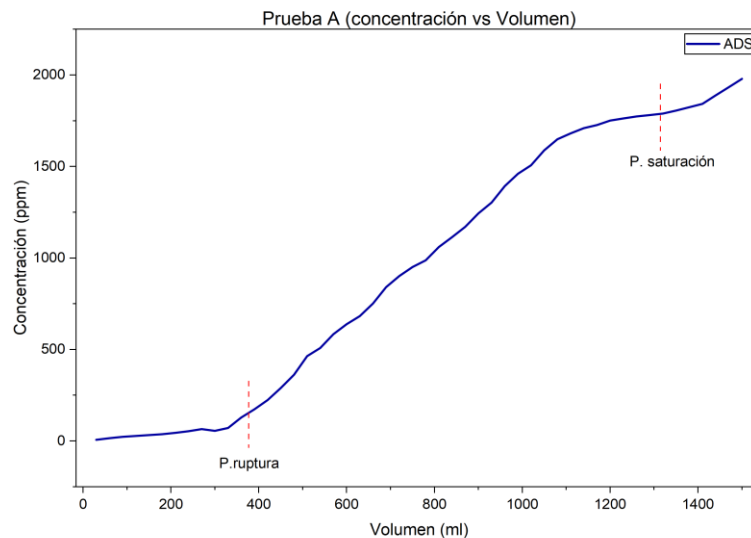
4.2.1 Prueba A

La Figura 9 muestra un comportamiento típico de adsorción en un lecho fijo en condiciones dinámicas, donde inicialmente se presenta una alta eficiencia de remoción hasta alcanzar el punto de ruptura el cual es aproximadamente el 10% de la concentración de entrada, alcanzándose a los 394 ml. A partir de este punto la concentración del efluente aumenta progresivamente, indicando

un proceso gradual de adsorbancia. El punto de saturación es el 90% de la concentración de entrada, el cual se alcanza aproximadamente a los 1320 ml, lo que evidencia un agotamiento del material adsorbente (carbón activado).

Figura 9

Prueba A (concentración vs volumen)



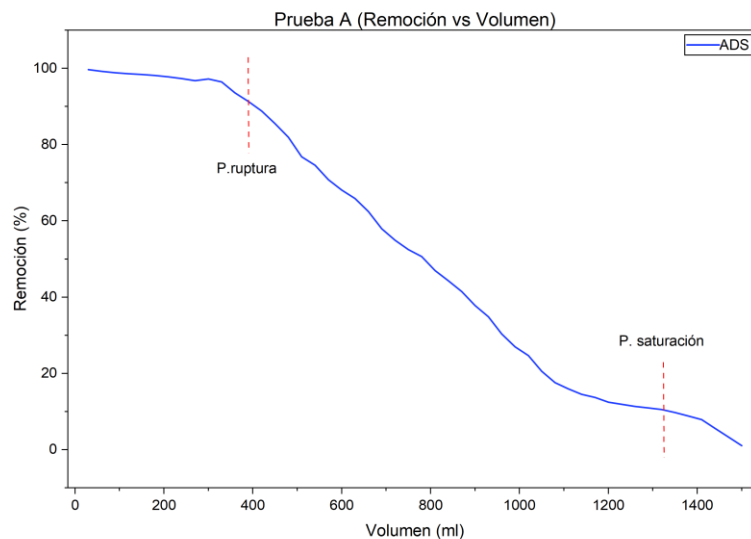
La Figura 10 muestra un comportamiento típico de adsorción en un lecho fijo en condiciones dinámicas, lo que permite identificar etapas en la remoción, como lo es la fase inicial, donde el carbón activado presenta una alta afinidad hacia el surfactante, lo que mantiene un porcentaje de remoción superior al 98% en los primeros 300 ml de la solución sintética de SDBS. Posteriormente, se observa el inicio del punto de ruptura el cual representa aproximadamente el 10% de la concentración de entrada del surfactante, localizándose cerca de los 400 ml de efluente vertido en el sistema de adsorción, a partir de este punto la concentración comienza a incrementar de manera sostenida debido a una saturación progresiva hasta alcanzar el punto de saturación a los

1320 ml de efluente vertido aproximadamente. Esto indica una disminución en el porcentaje de remoción, el cual cae por debajo del 90%, y se observa un agotamiento casi total en la capacidad de adsorción del lecho bajo las condiciones operacionales evaluadas.

La zona de transferencia de masa es moderada (pendiente de la curva), lo que se traduce como una resistencia significativa del SDBS a la difusión con respecto a la estructura porosa del lecho adsorbente. La evaluación de amplitud de la zona de transferencia de masa (Apéndice I) de 3,37 cm, esto indica que la zona de transferencia ocupa el 48% de la altura total del lecho, este valor recalca un frente de adsorción estable dentro de la columna, con un 52% de lecho no utilizado, lo cual ayuda como zona de protección o margen adsorción antes de la saturación completa del material.

Figura 10

Prueba A (remoción vs volumen)

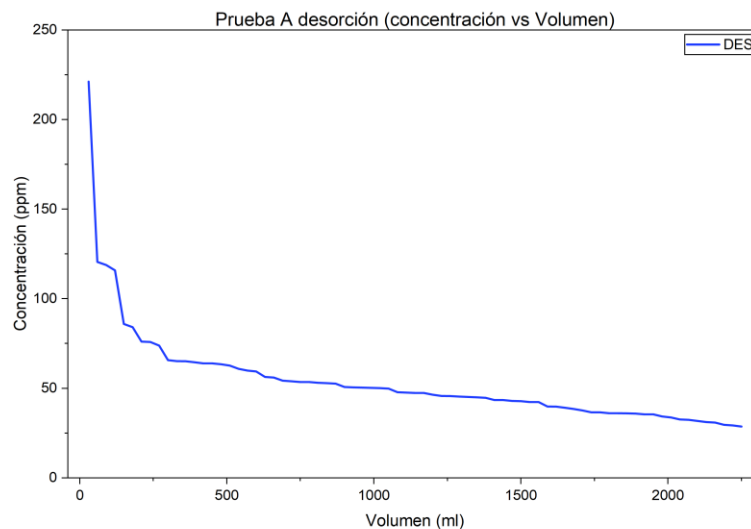


Se observa en la Figura 11 el inicio de ciclo de desorción (1) con una concentración aproximada de 220 ppm indicando una recuperación parcial del adsorbato, lo cual puede ocurrir por causantes tales como una adsorción fuerte o un atrapamiento del adsorbato en microporos.

La curva de desorción presenta una rápida liberación de SDBS en los primeros 30 min de la prueba, seguido de una liberación gradual controlada principalmente por la interacción de molécula-poro (difusión intraparticular), hasta llegar a una fase de estabilización lo cual indica una fuerte adsorción. Bajo la observación de la curva de desorción, se difiere una recuperación parcial del adsorbente.

Figura 11

Prueba A desorción (concentración vs Volumen)

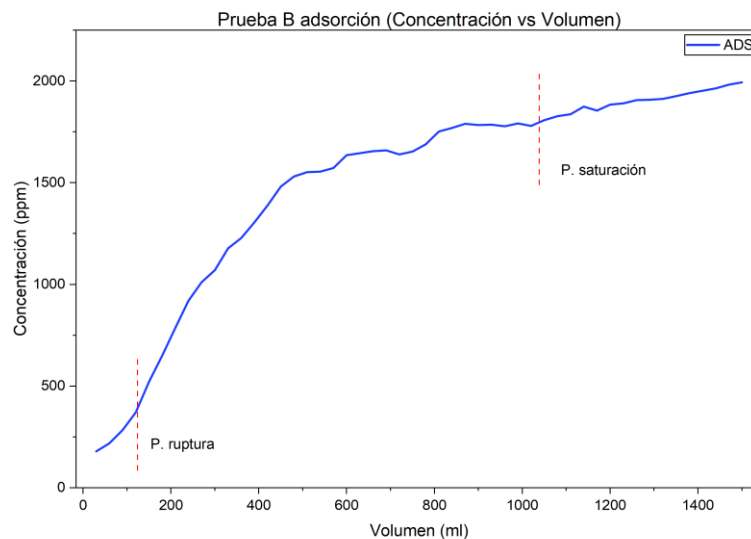


4.2.2 Prueba B

La prueba B se realiza posteriormente al primer ciclo de lavado (desorción) del lecho adsorbente de la prueba A manteniendo el mismo material y las mismas variables operacionales. La Figura 12 muestra un comportamiento más real de adsorción en un lecho fijo en condiciones dinámicas, donde inicialmente se presenta una alta eficiencia de remoción que decae rápidamente hasta alcanzar el punto de ruptura siendo este el 10% de la concentración de entrada, el cual se alcanza a los 130 ml, presentando una ruptura más temprana con respecto a la prueba (A.) A partir de este punto la concentración del efluente aumenta logarítmicamente, indicando un proceso progresivo de adsorbancia. El punto de saturación es el 90% de la concentración de entrada, el cual se alcanza aproximadamente a los 1030 ml, evidenciando un agotamiento prematuro del material adsorbente con respecto a la prueba A.

Figura 12

Prueba B (concentración vs volumen)



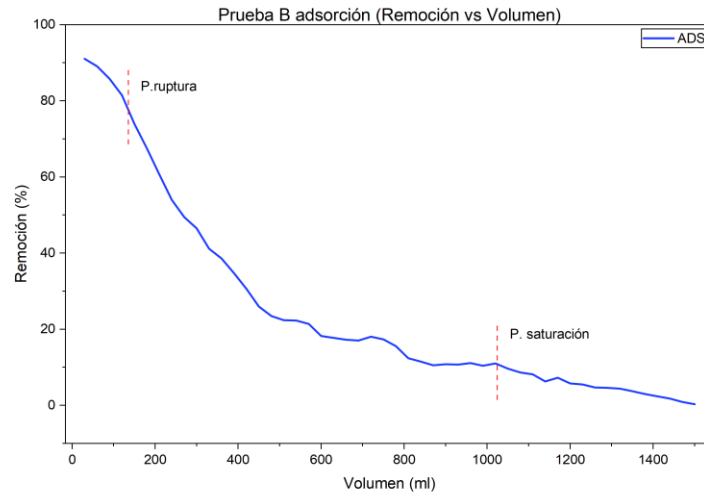
La Figura 13 muestra un comportamiento típico de adsorción en un lecho fijo en condiciones dinámicas, denota una disminución significativa en la eficiencia del sistema con respecto a la prueba A, aun así, mantiene un alto porcentaje de remoción del 89% en los primeros 90 ml de la solución sintética de SDBS. Posteriormente se observa el inicio del punto de ruptura el cual representa aproximadamente el 10% de la concentración de entrada del surfactante, localizándose cerca de los 130 ml de efluente vertido en el sistema de adsorción, indicando pérdida de retención instantánea del lecho adsorbente (una pérdida aproximada del 60% con respecto a la prueba A).

A partir de este punto la concentración comienza a incrementar de manera exponencial debido una saturación progresiva hasta alcanzar el punto de saturación a los 1030 ml de efluente vertido aproximadamente, lo que indica una disminución en el porcentaje de remoción, lo que indica un agotamiento casi total en la capacidad de adsorción del lecho bajo las condiciones operacionales evaluadas.

Evaluando la amplitud de la zona de transferencia de masa (ZTM) de 6,12 cm, indica que dicha zona ocupa el 87,4% de la altura total del lecho, lo que produce una ruptura casi instantánea al momento de que el frente de adsorción toque el fondo del sistema. En general se puede decir que, el SDBS no encuentra “sitios activos” disponibles en la superficie del material adsorbente, lo que produce una caída prematura en el porcentaje de remoción del carbón activado, confirmando que el primer ciclo de lavado no logró restituir por completo la capacidad de adsorción del lecho.

Figura 13

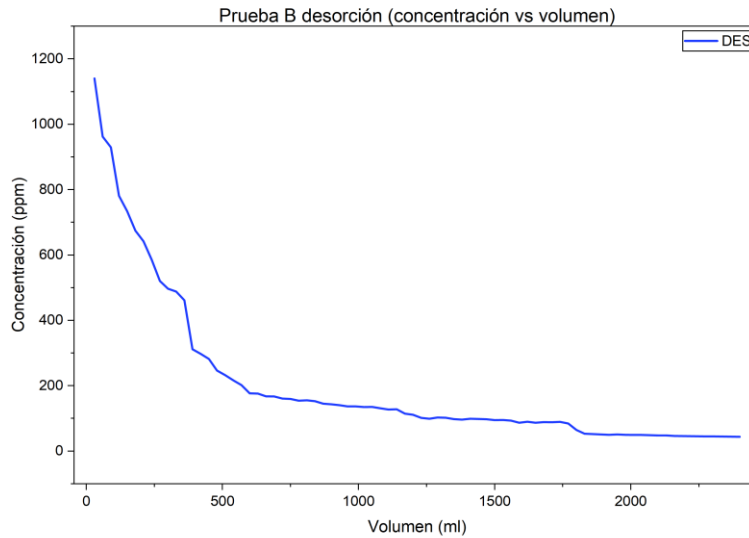
Prueba B (remoción vs volumen)



La Figura 14 denota el ciclo de desorción (2) del lecho adsorbente utilizado en las pruebas A y B, se observa la liberación inicial de SDBS con una concentración de 1140 ppm a los 30 ml de efluente, lo que evidencia una baja regeneración en el material adsorbente debido a la presencia de una fracción significativa de surfactante impregnada en la superficie de la materia (sitios activos saturados) de manera irreversible. Como consecuencia de ello, el lecho de carbón activado pierde significativamente su capacidad de adsorbancia en pruebas dinámicas.

Figura 14

Prueba B desorción (concentración vs volumen)



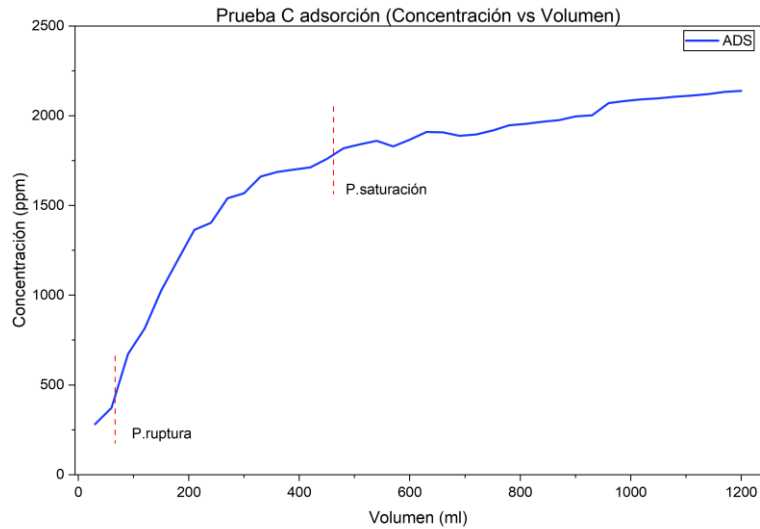
4.2.3 Prueba C

La prueba C se realiza posteriormente al segundo ciclo de lavado (desorción) del lecho adsorbente de la prueba A manteniendo el mismo material y las mismas variables operacionales. La Figura 15 muestra un deterioro en el lecho significativo, afectando la capacidad adsorbente del mismo, presenta un punto de ruptura prematuro el cual se alcanza a los 60 ml, se presenta una ruptura más temprana con respecto a las pruebas A y B.

A partir de este punto la concentración del efluente aumenta drásticamente de manera acelerada hasta llegar a su punto de saturación el cual se presenta aproximadamente a los 470,2 ml. En comparación con las pruebas anteriores se evidencia gran pérdida en la eficiencia del sistema, retribuyéndose a la reutilización del lecho adsorbente.

Figura 15

Prueba C (concentración vs volumen)



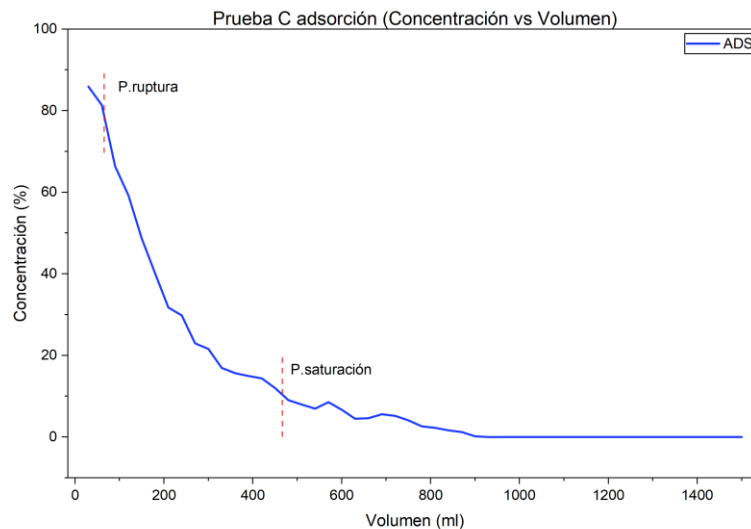
La Figura 16 muestra un estado de agotamiento del lecho irreversible, lo que denota una disminución significativa en la eficiencia del sistema con respecto a las pruebas A y B, con un porcentaje de remoción del 77% en los primeros 90 ml de la solución sintética de SDBS. Posteriormente se observa el inicio del punto de ruptura el cual representa el 10% de la concentración de entrada del surfactante, localizándose cerca de los 60 ml de efluente vertido en el sistema de adsorción, esto indica una pérdida de retención instantánea del lecho adsorbente (una pérdida aproximada del 85% con respecto a la prueba A).

Evaluando la amplitud de la zona de transferencia de masa (ZTM) de 6,5 cm, indica que la zona de transferencia ocupa el 92% de la altura total del lecho, lo que produce una ruptura instantánea al momento de que el frente de adsorción toque el fondo del sistema. Con los resultados se puede indicar que, el SDBS no encuentra "sitios activos" disponibles en la superficie del material adsorbente, lo que produce una caída prematura en el porcentaje de remoción del carbón

activado, confirmando que el segundo ciclo de lavado no logró restituir por completo la capacidad de adsorción del lecho.

Figura 16

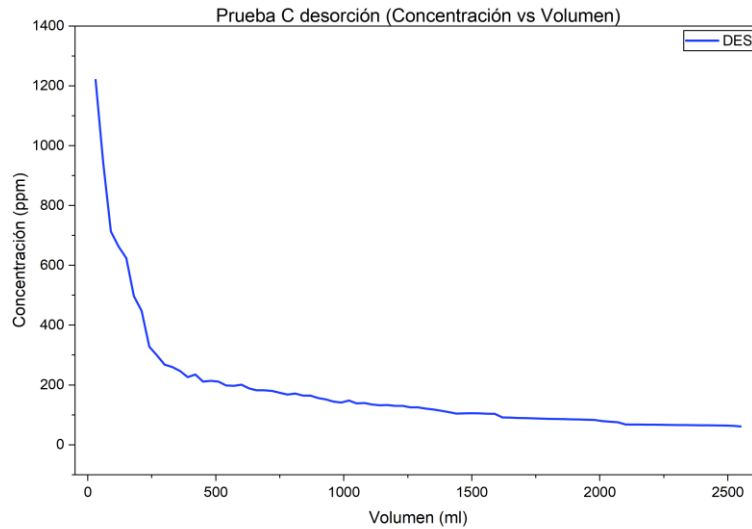
Prueba C (remoción vs volumen)



La Figura 17 evidencia el ciclo de desorción (3) perteneciente a las pruebas A y B, lo que representa un estado de saturación alto e irreversible del lecho adsorbente, debido a un acumulado residual de SDBS en la superficie de contacto del carbón activado y así el principal causante de su colapso. Se sugiere sustituir completamente el lecho adsorbente para este tipo de sistema, o someterlo a una regeneración térmica mucho más exhaustivo.

Figura 17

Prueba C desorción (concentración vs volumen)



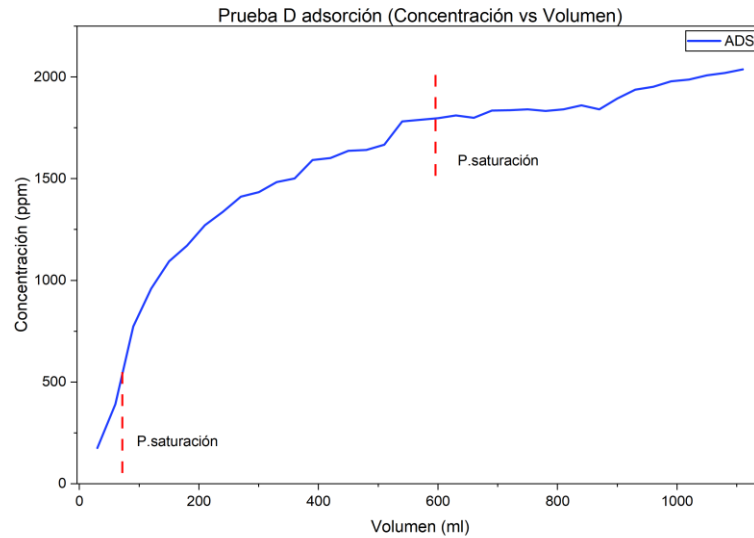
4.2.4 Prueba D

La prueba presenta condiciones de operación distintas con respecto a las pruebas anteriores, como el caudal y el tamaño de lecho (Tabla 6). Se hace uso de un nuevo lecho adsorbente, con el objetivo de evaluar el proceso de adsorción ante variaciones operacionales y de esta manera realizar una mejora en las variables de diseño.

Se observa en la Figura 18 un punto de ruptura prematuro (60,6 ml) y un punto de saturación acelerado (606 ml), La falta de una meseta de remoción al inicio sugiere que el tiempo de contacto es demasiado breve, impidiendo que el sistema compense la pérdida de capacidad del material adsorbente.

Figura 18

Prueba D (concentración vs volumen)

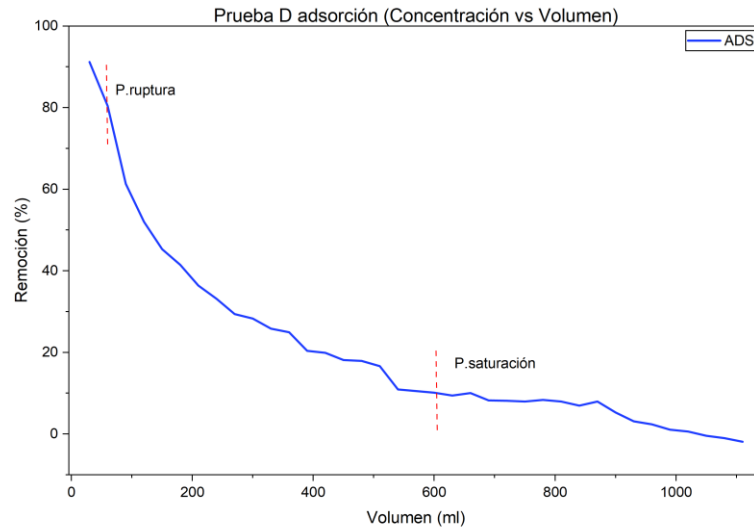


Se observa en la Figura 19 un porcentaje de remoción del 90% en los primeros 30ml de efluente, dicho porcentaje disminuye drásticamente a medida que avanza el tiempo de prueba, indicando una “vida útil” muy corta del material adsorbente.

El sistema no logra un régimen de adsorción completo por consecuencia al poco tamaño de lecho (3,5 cm), el cual tiene un tamaño muy similar a la zona de transferencia de masa ($ZTM = 3,14$ cm), lo cual resulta en un 89 % del material adsorbente. Se presenta un porcentaje del 87% de pérdida en la eficiencia de remoción con respecto a la prueba A (la más óptima).

Figura 19

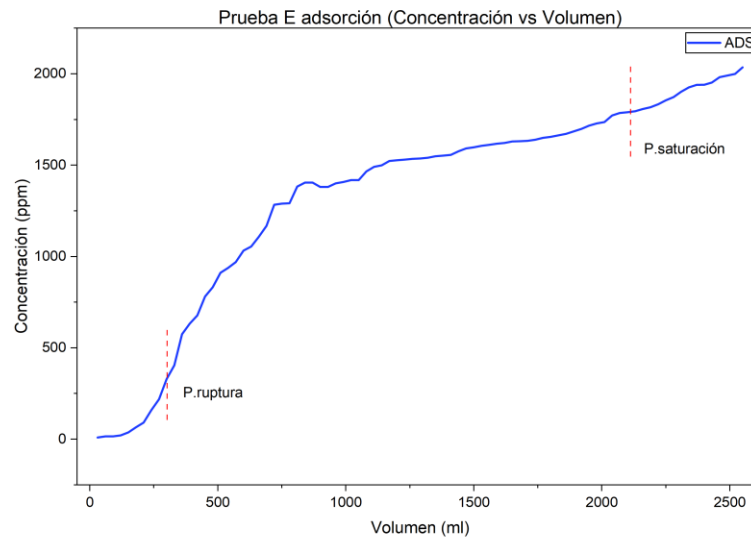
Prueba D (remoción vs volumen)



4.2.5 Prueba E

El ensayo se realiza manteniendo las condiciones de caudal (4,5 ml/m), se varía únicamente el tamaño de lecho (7 cm), con un material adsorbente virgen, siendo el objetivo, evaluar el proceso de adsorción ante variaciones operacionales y de esta manera realizar una mejora de las variables de diseño.

La Figura 20 presenta un punto de ruptura más amplio, con respecto a la prueba D, el cual se alcanza a los 320 ml y punto de saturación extendido de 2130 ml. Comparando los puntos de saturación, tomando el mejor escenario (prueba A) con el punto actual, indica una mayor capacidad de carga total del lecho adsorbente por parte de la prueba D, esto se debe principalmente en la disminución de caudal y aumento de lecho adsorbente, logrando un equilibrio en el tiempo de residencia del SDBS en el lecho, garantizando mayor impregnación del mismo en el carbón activado.

Figura 20*Prueba D (concentración vs volumen)*

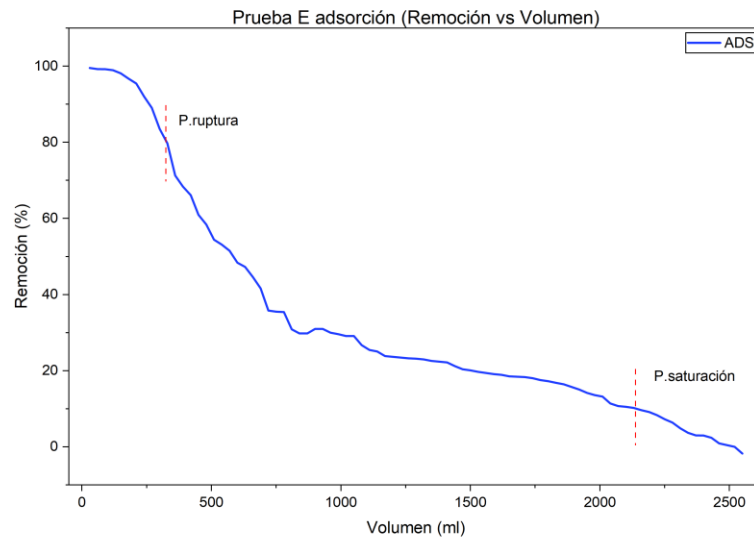
Se observa en la Figura 21 un porcentaje de remoción del 99% en los primeros 150 ml de efluente vertido, disminuyendo de manera progresiva hasta llegar a un punto de “estabilidad” en el porcentaje de remoción, posterior al punto de ruptura.

La zona de transferencia de masa tiene un valor aproximado de ($ZTM = 5,96$ cm), la cual ocupa un 85% del lecho adsorbente total, mantiene una zona de adsorción adicional o “zona de protección” antes de llegar a punto de saturación.

Se comparan los resultados con respecto a la prueba A, donde se observa una eficiencia similar entre ambas, pero un punto de saturación completamente diferente (La prueba E trata más volumen antes de saturarse por completo). Se presenta un incremento aproximado del 50% en la capacidad total de remoción.

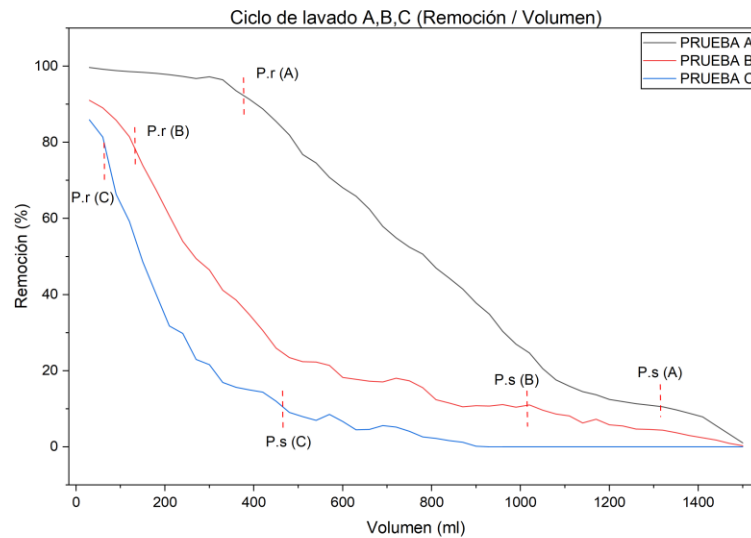
Figura 21

Prueba E (concentración vs volumen)

**4.3 Ciclos de lavado**

Se analiza el impacto que produce los ciclos de lavado (desorción) a la eficiencia en procesos de remoción con carbón activado. La Figura 22 evalúa el desempeño de remoción del material con respecto a cada desorción, se realiza la evaluación tomando como referencia los puntos de ruptura (P.r) y los puntos de saturación (P.s), el porcentaje de remoción, el volumen tratado y el tiempo total de saturación de cada prueba realizada.

La prueba A se efectúa bajo condiciones de lecho virgen, la cual cumplirá como punto de referencia para la evaluación de la eficiencia de adsorción de las pruebas B y C, mediante la evaluación de resultados de porcentaje de remoción.

Figura 22*Ciclo de lavado (A,B y C)*

Se evidencia las curvas de ruptura para las tres pruebas (A, B y C), en donde se indica que la prueba A presenta el mejor desempeño, con una capacidad de tratamiento mayor antes de la saturación. Por otra parte, las pruebas B y C muestran una pérdida de eficiencia prematura y un agotamiento del lecho adsorbente más pronunciado, con volúmenes tratados significativamente menores antes de saturación; este comportamiento está ligado con la reducción en la disponibilidad de sitios activos o en una ZTM menos eficiente con respecto a las condiciones de las pruebas.

4.4 Indicadores de desempeño en la remoción de SDBS a partir de carbones activados

4.4.1 Análisis de la eficiencia de remoción de SDBS frente a ciclos de regeneración (desorción)

El uso de surfactantes tales como el dodecibencenosulfonato (SDBS) en variados procesos industriales, siendo la industria de los hidrocarburos uno de sus mayores consumidores, empleado

en métodos de recobro mejorado (EOR), el cual genera efluentes contaminantes que requieren de una disposición final, sin antes realizar un tratamiento de remoción eficiente.

Es de suma importancia el análisis de la eficiencia de remoción de SDBS frente a ciclos de regeneración, siendo de manera ineludible la cuantificación con respecto a la pérdida de rendimiento del adsorbente (carbón activado) tras ciclos de desorción. El análisis comparativo se realiza con respecto al porcentaje de remoción del material virgen y el regenerado (adsorción), se obtiene datos sobre la eficiencia volumétrica recuperable.

Tabla 10

Evaluación de la capacidad de remoción y pérdida de eficiencia post-lavado del carbón activado (prueba A, B y C)

Parámetros	Prueba A	Prueba B	Prueba C
(P.r)	394 ml	130 ml	62,7 ml
(P.s)	1320 ml	1030 ml	470 ml
(η_v)	29,8 %	13,5 %	12,7%
(η_{VT})	51,33%	24,0%	19,6%
(η_{ac})	53,3%	26,0%	16,1%
(η_{gl})	99,0%	78,0%	36,0%
($\Delta\eta_{reg.}$)	>1%	22%	64,0%

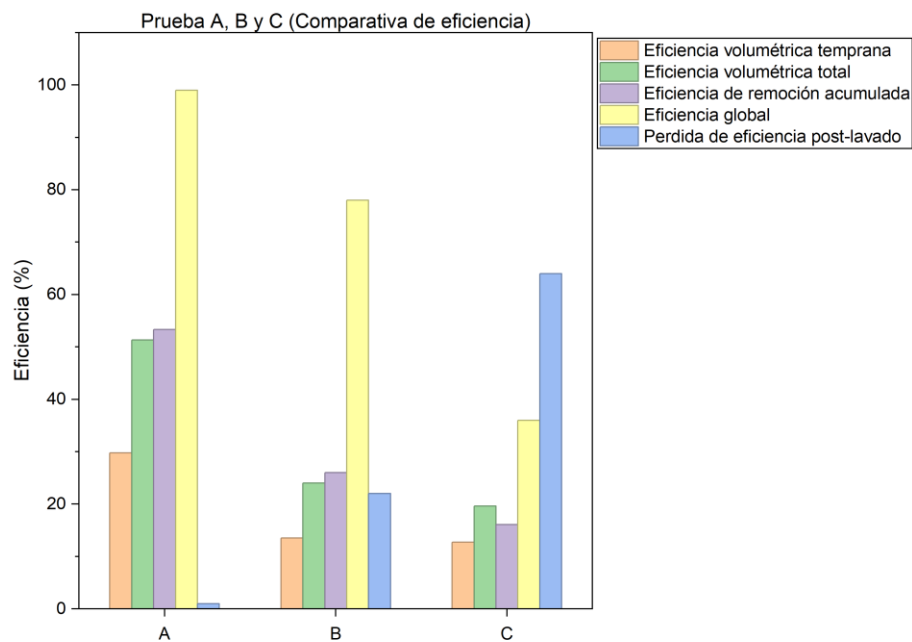
Nota: (P.r) corresponde a punto de ruptura, (P.s) corresponde a punto de saturación, (η_v) corresponde a eficiencia volumétrica temprana, (η_{VT}) corresponde a eficiencia volumétrica total, (η_{ac}) corresponde a eficiencia de remoción acumulada, (η_{gl}) corresponde a eficiencia global, ($\Delta\eta_{reg.}$) corresponde a pérdida de eficiencia post-lavado.

El análisis de los resultados presentes en la Tabla 10 indican una pérdida progresiva por cada ciclo de lavado (desorción) afectando de manera significativa la capacidad de adsorción del carbón activado. La prueba A, siendo la prueba de referencia (lecho virgen) presenta un excelente

desempeño con una eficiencia de remoción global del 99%. Por otra parte, la prueba C presenta un desempeño considerablemente menor, con una eficiencia de remoción global del 36%, lo que confirma la pérdida de eficiencia post-lavado (64% de pérdida). El método de regeneración no logra una eliminación total del SDBS debido a una saturación irreversible del lecho adsorbente.

Figura 23

Análisis gráfico de la capacidad de remoción y pérdida de eficiencia post-lavado del carbón activado (prueba A, B y C).



4.4.2 Análisis de la eficiencia de remoción de SDBS frente a variables operacionales

La eficiencia en la remoción del SDBS no depende exclusivamente de las propiedades presentes en el material adsorbente, es fundamental el análisis de la eficiencia de remoción de SDBS con respecto a variables operacionales (variación de caudal y tamaño de lecho), tomando la geometría del lecho, la dinámica del fluido, el tiempo de contacto. Estas variables son, un punto

clave para determinar el comportamiento del sistema y, así tener una mejora en su eficiencia de remoción mediante las condiciones más favorables de operación.

Tabla 11

Evaluación de la eficiencia de remoción frente a variaciones operacionales (prueba D y E)

Parámetros	Prueba D	Prueba E
(P.r)	60,6 ml	320 ml
(P.s)	606 ml	2130 ml
(η_v)	6,6%	32 %
(η_{VT})	20,5%	33,4%
(η_{ac})	12,5%	33,6%
(η_{gl})	77,6%	96%

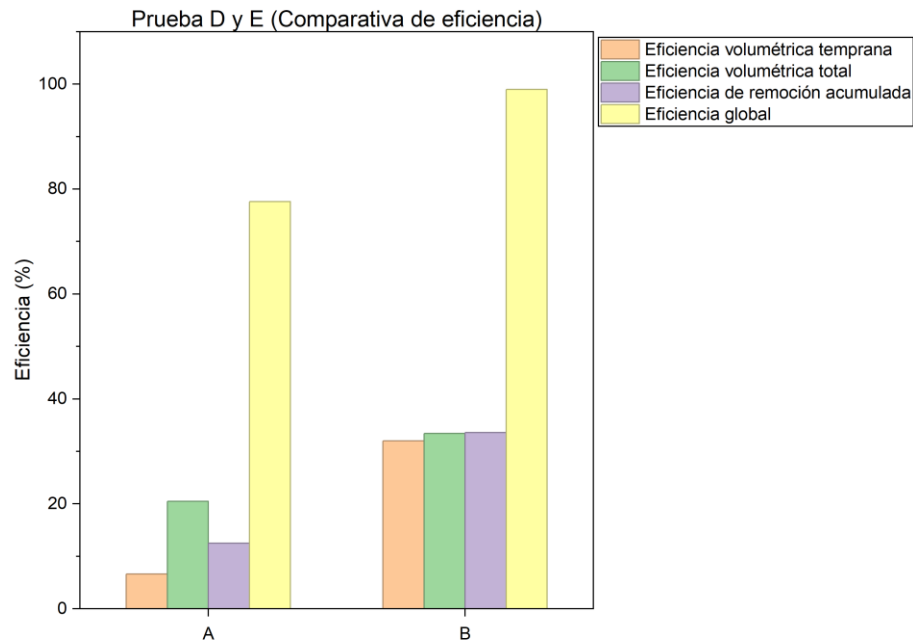
Nota: (P.r) corresponde a punto de ruptura, (P.s) corresponde a punto de saturación, (η_v) corresponde a eficiencia volumétrica temprana, (η_{VT}) corresponde a eficiencia volumétrica total, (η_{ac}) corresponde a eficiencia de remoción acumulada, (η_{gl}) corresponde a eficiencia global, ($\Delta\eta_{reg.}$) corresponde a pérdida de eficiencia post-lavado.

La Tabla 11 analiza las variantes operacionales y su repercusión a la eficiencia de remoción del SDBS, donde se observa una diferencia considerable entre las pruebas, siendo la prueba E la que presenta un mejor desempeño en todos sus indicadores, logrando un incremento en la capacidad de tratamiento o servicio del lecho antes de ruptura cinco veces mayor con respecto a la prueba D.

En términos de eficiencia global, la prueba E presenta una remoción del 99% frente a un 77,6% de la prueba D, lo que sugiere, que un mayor tiempo de residencia mejora la dinámica de adsorción, permitiendo un aprovechamiento más preciso de la zona de transferencia de masa (ZTM) en su capacidad de remoción.

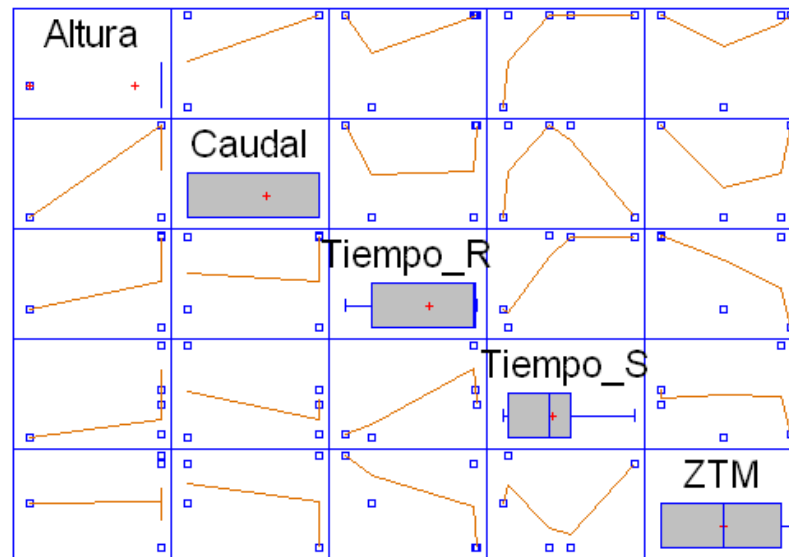
Figura 24

Análisis gráfico de la eficiencia del carbón activado frente a variaciones operacionales (prueba D y E)

**4.5 Efecto de las variables de un proceso usando análisis estadístico**

Para el análisis de los resultados de remoción se consideran como variables independientes el tiempo de ruptura, el tiempo de saturación, el caudal, la altura, y el parámetro ZTM. Por otra parte, como variables de respuesta o variables dependientes se seleccionaron los rendimientos a la ruptura y saturación. El tiempo de ruptura es importante para la práctica operativa, y el tiempo de saturación juega un papel importante sobre la capacidad total del adsorbente.

En la Figura 25 se muestra la matriz de gráficos de dispersión. Cada celda representa la relación entre dos variables y permite el primer análisis exploratorio de datos cuando el número de ensayos no es muy amplio como sucede este trabajo, el cual cuenta con cinco (5) pruebas.

Figura 25*Matriz de gráficos de dispersión*

La matriz de gráficos de dispersión permite establecer relaciones entre variables. Por ejemplo, si dos variables independientes están correlacionadas, es posible descartar una de ellas dado que se puede afectar el modelo de regresión múltiple. De la figura se pueden establecer las siguientes observaciones:

- Altura vs Caudal: No se observa una relación clara existen datos discretos.
- Altura vs Tiempo de ruptura: No hay un patrón definido.
- Altura vs Tiempo de saturación: No hay relación clara, no hay variabilidad interna.
- Caudal vs Tiempo de ruptura: No hay un patrón definido.
- Caudal vs Tiempo de saturación: Puede existir una relación inversa débil.
- Tiempo de ruptura vs Tiempo de saturación: Puede existir una relación positiva moderada.

Los resultados permiten evidenciar que entre las variables seleccionadas no existen relaciones marcadas. Sin embargo, existe una tendencia positiva entre los tiempos de ruptura y saturación. El parámetro ZTM depende de los tiempos de ruptura y saturación, pero muestra una

débil tendencia con el tiempo de ruptura. En forma general, las variables son relativamente independientes y pueden ser consideradas para construir un modelo.

Para el desarrollo de los modelos del rendimiento de remoción de surfactante, se seleccionarán las mejores variables independientes. Para este propósito, con la herramienta Statgraphics versión libre en la opción *Regression Model Selection* se seleccionan las variables para los modelos de remoción al tiempo de ruptura y tiempo de saturación.

4.5.1 Modelo remoción al tiempo de ruptura (*Remoción_TR*)

En la Tabla 12 se muestra el análisis de varianza (ANOVA) del porcentaje de remoción de surfactante en el punto de ruptura con las variables independientes seleccionadas.

Tabla 12

Análisis de Varianza (ANOVA) para la remoción en el punto de ruptura.

Fuente de variación	Suma de cuadrado	Suma de cuadrados medio	Estadístico F	P-Valor
Modelo	91.0923	45.5461	48.14	0.0204
Residual	1.89239	0.946194		
Total	92.9847			
Tabla de Regresión				
Variable	Parámetro, β	Error estándar	t student	P-Valor
Constante	79.7118	2.06546	38.5928	0.0007
Altura	1.4172	0.310728	4.5609	0.0449
ZTM	-0.00135	0.00015575	-8.66927	0.013
R ²	97.96			
R ² ajustado	95.93			

La correlación del modelo se describe con la ecuación 5.

$$\% \text{ Remoción}_{TR} = 79.7118 + 1.4172 * H - 0.00135 * ZTM \quad 5)$$

La correlación muestra un buen valor del coeficiente de correlación R^2 , lo cual explica el 97.96 % de variabilidad de los resultados. Por otra parte, los valores de los parámetros estadístico-F y P-Valor indican que la correlación es útil y significativo. Así mismo, los valores diferente de cero del parámetro t – student muestra que el grado de importancia de las variables está en el orden decreciente $\text{Altura} > \text{ZMT}$. De acuerdo con los valores $p < 0.05$ se puede deducir que la altura como el ZTM son variables estadísticamente significativas en el estudio.

4.5.2 Modelo Remoción al tiempo de saturación (Remoción_TS)

En la Tabla 13 se muestra el análisis de varianza (ANOVA) y los parámetros estadísticos del porcentaje de remoción de surfactante en el punto de saturación con las variables independientes.

Tabla 13

Análisis de Varianza (ANOVA) para la remoción en el punto de saturación.

Fuente de variación	Suma de cuadrado	Suma de cuadrados medio	Estadístico F	P-Valor
Modelo	283.178	94.3928	1806592.56	0.0005
Residual	0.00005	0.00005		
Total	283.178			

Tabla de Regresión				
Variable	Parámetro, β	Error estándar	t student	P-Valor

Constante	48.2327	0.0160591	3003.46	0.0002
Caudal	-0.0346191	0.0021802	-15.8789	0.04
Altura	-5.34083	0.00311893	-1712.39	0.0004
ZTM	-0.0000807	1.3605E-06	-59.3023	0.0107
R ²	99.85			
R ² ajustado	98.92			

La correlación del modelo se describe con la ecuación 6.

$$\% \text{Remoción}_{T_s} = 48.2327 - 0.0346 * Q - 5.3408 * H - 0.0000807 * ZTM$$

La correlación de remoción de surfactante en el punto de saturación muestra que el coeficiente de correlación R² explica el 99.85 % de la variabilidad de los resultados. El parámetro estadístico F es alto y el parámetro P-Valor total es de 0.005, lo cual indican que la correlación establecida es significativa. Al igual que la correlación de remoción de surfactante al punto de ruptura, los valores diferentes de cero del parámetro t – student indican que las variables seleccionadas muestran importancia en la correlación y su grado de importancia está en el orden decreciente Caudal > Atura > ZTM. De acuerdo con los valores p < 0.05 se puede deducir que las tres variables son estadísticamente significativas.

En forma general, se puede indicar a partir de los parámetros estadísticos que las correlaciones establecidas para la remoción de surfactante en el punto de ruptura y saturación muestran tendencias con la variación de las variables seleccionadas. Sin embargo, estas correlaciones deben interpretarse con moderación debido al tamaño reducido de las pruebas experimentales.

4.6 Construcción de isotermas de adsorción

Es posible estimar el comportamiento de la adsorción en carbones activados mediante isotermas de adsorción, para ello, se modeló mediante Langmuir, Freundlich y Temkin, comparando cuál de estos modelos matemáticos se ajusta mejor con los datos obtenidos.

Se realizaron las pruebas de equilibrio de adsorción, con un tiempo de duración de 48 h, indicado en la literatura como tiempo óptimo de equilibrio de adsorción. Se toman volúmenes de 5ml de distintas concentraciones como referencia (200 hasta 2000 ppm); y se adiciona 0,1g del carbón activado, previamente se realiza un proceso de agitación (centrifugado) con temperatura constante de 65 °C. Finalizado el proceso de agitación se procede a una medición de concentración de cada muestra mediante UV-VIS. La Tabla 14 muestra la concentración de equilibrio (C_e) y la masa adsorbida (q_e) de cada una de las muestras.

Tabla 14

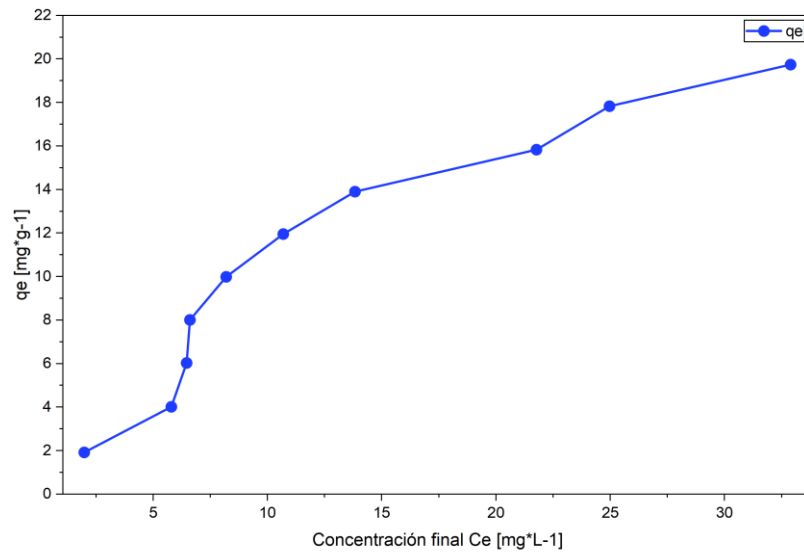
Análisis de la concentración en equilibrio y masa adsorbida mediante a través del uso de carbones activados.

Concentración inicial (C_i)	Concentración final C_e [$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$]	q_e [$\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$]
200	1,9841	1,9165
400	5,7972	4,0127
600	6,4629	6,0263
800	6,6121	8,0046
1000	8,1982	9,9887
1200	10,6945	11,9537
1400	13,8288	13,9021
1600	21,7747	15,8328
1800	24,9657	17,8311
2000	32,8916	19,7418

Se construye la isoterma de adsorción no linealizada con los datos obtenidos anteriormente, constituyendo la gráfica de la Figura 26.

Figura 26

Isoterma de adsorción no linealizada.



Una vez se realiza la linealización de los datos (Tabla 15), se gráfica cada modelo representado en la

Figura 27, Figura 28 y Figura 29.

Tabla 15

Linealización del SDBS mediante modelos de adsorción.

SDBS					
Freundlich		Langmuir		Temkin	
Log Ce	Log qe	1/Ce	1/qe	Ln Ce	Ln qe
0,2975	0,2825	0,5040	0,5217	0,5866	3,0067
0,7632	0,6034	0,1724	0,2492	1,3106	3,7545
0,8104	0,7800	0,1547	0,1659	1,7369	4,1637

0,8203	0,9033	0,1512	0,1249	2,0310	4,4538
0,9137	0,9995	0,1219	0,1001	2,2589	4,6770
1,0291	1,0775	0,0935	0,0836	2,4486	4,8586
1,1407	1,1430	0,0723	0,0719	2,6101	5,0117
1,3379	1,1995	0,0459	0,0631	2,7478	5,1415
1,3973	1,2511	0,0400	0,0560	2,8705	5,2590
1,5170	1,2953	0,0304	0,0506	2,9790	5,3618

Figura 27

Modelo de Freundlich (isoterma linealizada).

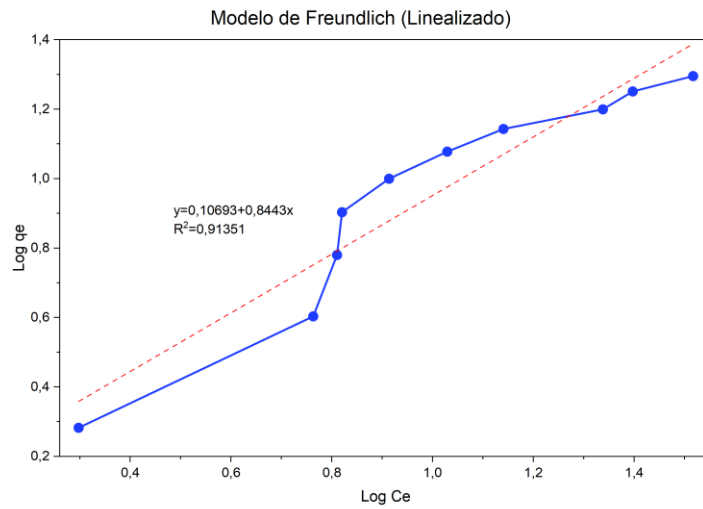
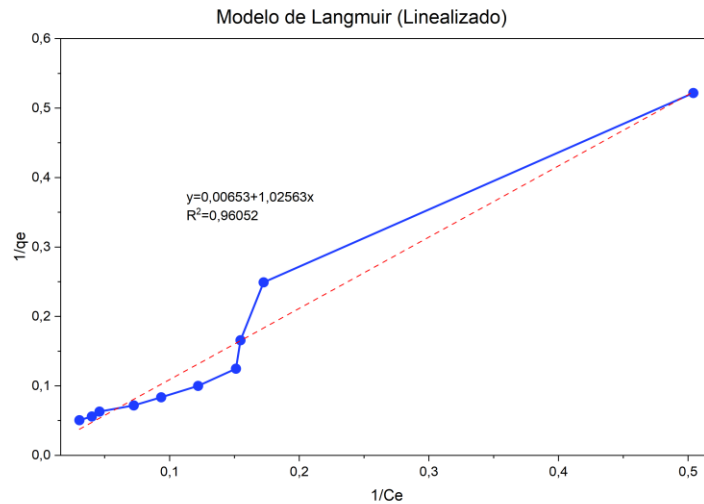
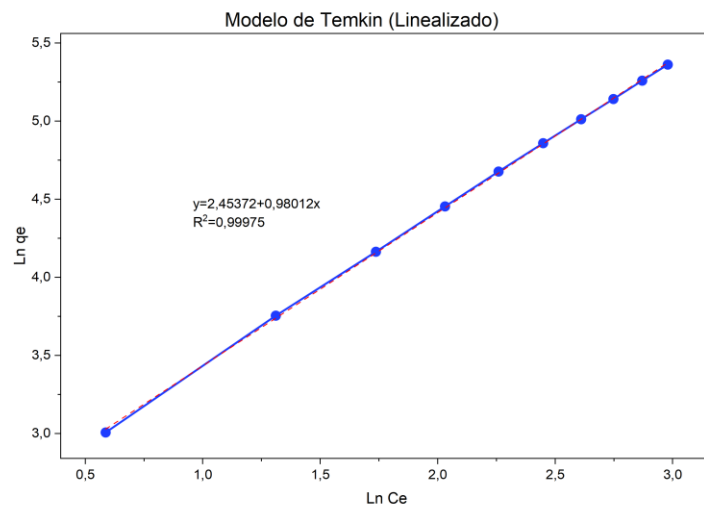


Figura 28

Modelo de Langmuir (isoterma linealizada).

**Figura 29**

Modelo de Temkin (isoterma linealizada).



Se observa que el modelo que presenta mejor ajuste es el modelo de Temkin, el cual presenta un coeficiente de determinación ($R^2 = 0,999$) lo que se traduce como un buen ajuste del modelo con respecto a los datos experimentales. El ajuste en el modelo de Temkin confirma que no es una adsorción completamente homogénea (el SDBS sobre el carbón activado), ni sigue un modelo monocapa. Concluye que la energía de adsorción disminuye a medida que se “saturan” los sitios activos en la superficie del carbón activado.

5. Discusión

El estudio permitió determinar la efectividad del carbón activado en la remoción de SDBS en condiciones dinámicas, con una eficiencia global superior al 90% bajo condiciones específicas (caudal de 4,5 ml/min y altura de lecho de 7 cm). Este valor de eficiencia sobrepasa el planteado en la hipótesis inicial (León et al., 2023).

La alta eficiencia se atribuye a una apropiada selección de los parámetros de síntesis, como la relación de impregnación con H_3PO_4 , temperatura de pirólisis y tiempo de reacción. Se evidencia un correcto desarrollo de la estructura mesoporosa de los carbones activados con una alta área superficial, tal como se describe para carbones activados obtenidos a partir de biomasa residual (Jun et al., 2021).

Existe una fuerte dependencia de la eficiencia de adsorción con respecto a las variables operacionales, lo cual se muestra con la disminución del caudal (de 9 ml/min a 4,5 ml/min), lo cual incrementó el tiempo de residencia del efluente y permite una difusión más efectiva del SDBS con los sitios activos del adsorbente. Los resultados reflejados en el aumento de volumen tratado hasta punto de saturación concuerdan con lo reportado por Zhang et al., 2021, donde demostraron que caudales bajos mejoran la transferencia de masa en sistemas de lecho empacado.

Los ciclos de lavado con agua destilada a 65 °C resultan limitados para la restauración de la capacidad de adsorción del carbón activado. Esto debido a la pérdida de eficiencia en la remoción (65%) y una reducción de volumen tratado antes de alcanzar punto de saturación. La pérdida de eficiencia es provocada por una fuerte adsorción del SDBS en los microporos del carbón

activado, donde las fuerzas de interacción son mayores y los métodos de desorción convencionales no logran la remoción de dichas moléculas adsorbidas (Fallou et al., 2016).

6. Conclusiones

La cascara de nuez de palma africana como biomasa, resulta ser el material predilecto para la síntesis de carbón activado, dado a su alto contenido en celulosa, hemicelulosa y lignina. Para un eficiente desarrollo en la estructura porosa se opta por la ruta de síntesis que incluye una etapa de impregnación química con ácido fosfórico (H_3PO_4) con una relación 1:8, con temperatura de pirólisis de 480 °C con un tiempo de proceso de 30 min.

De acuerdo con los resultados de la literatura se puede indicar que la variable que más afecta el área superficial es la relación de impregnación, seguido de la temperatura de pirolización. Esto se debe a que el uso de una baja relación de impregnación produce un incorrecto desarrollo en la estructura porosa del material, lo que afecta el área total disponible para los procesos de adsorción. La temperatura de pirólisis es fundamental en la eliminación de compuestos volátiles y la dilatación de poros, lo que sugiere un control preciso, ya que temperaturas muy altas provocan el colapso en la estructura porosa.

El sistema opera bajo una fuerte dependencia de la profundidad del lecho para garantizar una zona de transferencia de masa efectiva. A partir de los resultados se puede indicar, que alturas de lecho inferiores a 5 cm resultan insuficientes para el tratamiento de concentraciones de SDDBS cercanas a los 2000 ppm.

La influencia de las variables operacionales en procesos dinámicos está fuertemente marcada en el estudio, se evidencia que el porcentaje en la eficiencia de remoción del SDBS con carbones presenta una dependencia considerable (con el caudal y la altura del lecho). Por lo tanto, una disminución en el caudal de 9 a 4,5 ml/min con un tamaño de lecho de 7 cm incrementa de manera considerable el tiempo de residencia, significando en una mayor eficiencia de adsorción del surfactante aniónico (SDBS), con un punto de saturación más extendido. El sistema presentó una excelente eficiencia de remoción global ($> 90 \%$).

Por otra parte, los ciclos de lavado no logran restablecer por completo la capacidad de adsorción del lecho filtrante, lo cual se evidencia tras el segundo ciclo de lavado (prueba C), la pérdida de eficiencia del 64% con respecto a un lecho virgen y una reducción en el volumen tratado antes de llegar a su punto de saturación pasando de (1320 ml a 470 ml).

A través de las isotermas de adsorción se determina el comportamiento del adsorbato sobre el adsorbente, siendo un paso fundamental la selección del modelo adecuado. El modelo de Temkin presentó el mejor ajuste a los datos experimentales ($R^2 = 0,99$), lo que indica que el proceso de adsorción del SDBS no ocurre en una monocapa. Por tanto, se puede decir, que existe una pérdida de energía progresiva en el proceso de adsorción a medida que las “sitios activos” se saturan en la superficie de contacto.

7. Recomendaciones

Realizar una evaluación de métodos alternativos de regeneración de carbones activados como el lavado con solventes orgánicos de baja toxicidad, y regeneración térmica a temperaturas entre 300-400 °C en atmosfera inerte, entre otras.

Se recomienda realizar un análisis de caracterización física del área superficial (BET) y espectroscopia FTIR al carbón activo después de varios ciclos de operación (adsorción-desorción), con el fin de determinar si la pérdida de eficiencia se debe a un proceso físico o es producto de una degradación química de los grupos funcionales del adsorbente.

Aplicar un modelo de transporte de masa más “robusto” como el modelo de Adams-Bohart o Yoon-Nelson para la predicción de comportamiento del sistema a escala piloto, lo que permite un correcto dimensionamiento de torres de adsorción industriales, con una mejor relación de altura de lecho con el tiempo de residencia hidráulico.

Para estudios posteriores, se recomienda no utilizar alturas de lecho menores a 5cm para concentraciones de SDBS superiores a 2000 ppm, debido a la generación de zonas de transferencia de masa con el mismo tamaño de lecho, lo que produce una ruptura prematura y una eficiencia global de remoción reducida.

Referencias Bibliográficas

- Alsawy, T., Rashad, E., El-Qelish, M., Mohammed, R. H., et al. (2022). A comprehensive review on the chemical regeneration of biochar adsorbent for sustainable wastewater treatment. *npj Clean Water*, 5, Article 29.
- Bayona, C. O. (2023). Análisis de tecnologías para el tratamiento de aguas de producción de la industria de hidrocarburos y su potencial uso en sistemas de riego [Tesis de especialización, Fundación Universidad de América]. Repositorio Institucional.
- Communications. (2025, 4 de diciembre). Colombia se ubica como el cuarto productor mundial y primero en América de aceite de palma. BBVA NOTICIAS.
- Environmental Protection Agency. (2017). National Recommended Water Quality Criteria - Aquatic Life Criteria Table.
- Fallou, H., Cimetière, N., Giraudet, S., Wolbert, D., & Cloirec, P. L. (2016). Adsorption of pharmaceuticals onto activated carbon fiber cloths – Modeling and extrapolation of adsorption isotherms at very low concentrations. *Journal of Environmental Management*, 166, 544-555.
- Feng, X., Liu, Y., Li, X., & Liu, H. (2022). RSM, ANN-GA and ANN-PSO modeling of SDBS removal from greywater in rural areas via Fe₂O₃-coated volcanic rocks. *RSC Advances*, 12(10), 6265–6278.

Georgie, W. J., Sell, D., & Baker, M. J. (2011). Produced Water Volume Estimates and Management Practices. PRIMAS (Oil & Gas) Consultancy; Cordah Limited; University of Aberdeen.

León, A. Y., Contreras-Arenas, J. D., Garnica-Fuentes, C. F., et al. (2023). Eliminación de compuestos orgánicos en aguas residuales mediante nanopartículas de carbón activado a base de cáscara de cacao: SiO₂. *Environment, Development and Sustainability*.

León, A. Y., Rincón, J. R., Rodríguez, N., et al. (2022). Optimización de las condiciones de preparación del carbón activado a base de cáscara de cacao y su evaluación como material adsorbente de sales. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19, 7777–7790.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Resolución 0631 de 2015: Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.

Murillo, C. A., Gomez, O. A., Ortiz Cancino, O. P., & Muñoz, S. F. (2015). Aplicación de modelos para la generación de la isoterma de adsorción de metano en una muestra de shale y su impacto en el cálculo de reservas. *Fuentes: El reventón energético*, 13(2), 131-140.

- Naranjo-Fernández, D. (2022). Alternativas de vertimiento y reúso de aguas de producción de yacimientos convencionales y no convencionales de crudo y gas en Colombia. *Revista EIA*, 20(39), 1–61.
- Ortega Ramirez, A. T. (2019). Estrategia para el uso sostenible de agua de producción para riego de suelos, adaptada de la experiencia del desierto de Omán a un patrón de pozos en un campo colombiano [Tesis de maestría, Fundación Universidad de América]. Repositorio Institucional.
- Prada Rojas, A. F. (2021). Revisión de las tecnologías para el tratamiento de aguas de producción petrolera para su aprovechamiento en el riego de cultivos [Trabajo de grado, Universidad de América].
- Rincón Remolina, J. R. (2020). Síntesis de carbón activado a partir de cáscara de cacao como adsorbente en aguas contaminadas con sales orgánicas e inorgánicas [Tesis de posgrado, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio UIS.
- Robertson, J. O., & Chilingar, G. V. (2017). *Environmental Aspects of Oil and Gas Production*. John Wiley & Sons.
- Severiche, C., Castillo, M., & Acevedo, R. (2013). *Manual de Métodos Analíticos para la Determinación de Parámetros Físicoquímicos Básicos en Aguas*. Biblioteca Virtual EUMED.NET.

- Sivaranjane, R., Kumar, P. S., & Mahalaxmi, S. (2022). A review on agro-based materials on the separation of environmental pollutants from water system. *Chemical Engineering Research and Design*, 181, 423–457.
- Soto, C. (2019). Perfil de Invasión de un Surfactante aniónico en Procesos de Recobro Mejorado [Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio UNAL. Universidad de Sevilla. (2011). *Manual del Carbón Activo*. Aula Aguapedia.
- Xu, J., et al. (2021). Fate and behavior of surfactants in oilfield produced water treatment. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 205, 108–125.
- Xu, T., & Huang, C. (2008). Electrodialysis-based separation technologies: A critical review. *AIChE Journal*, 54(12), 3147–3159.
- Yudhowijoyo, A., Rafati, R., Sharifi Haddad, A., Pokrajac, D., & Mehrdad Manzari, M. (2019). Desarrollo de geles nanocompuestos a partir de biopolímeros para el control de fugas en pozos de petróleo y gas [Conferencia]. SPE Offshore Europe Conference and Exhibition, Aberdeen, Reino Unido.
- Zhang, H., He, L., Luo, H., & Zhang, W. (2018). Adsorption characteristics of anionic surfactant sodium dodecylbenzene sulfonate on the surface of montmorillonite minerals. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(10), 3190.

Zhang, L., Li, H., Zhao, Y., & Wang, Y. (2021). Effect of particle size on adsorption capacity and kinetics of activated carbon for dyes. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 610, 125707.

Apéndices

Apéndice A

Cálculo de la masa total alimentada M_{al}

$$M_{al}(mg) = \frac{C_{0(ppm)} * V_b(ml)}{1000}$$

Es la cantidad de SDBS que entra en el sistema hasta el volumen que se analiza

Apéndice B

Cálculo de la masa escapada M_{esc}

$$M_{esc}(mg) = \frac{\text{area bajo la curva (ppm * ml)}}{1000}$$

Es la masa que salió por el efluente y que el carbon no atrapó

Apéndice C

Cálculo de la masa adsorbida M_{ads}

$$M_{ads} = M_{al}(mg) - M_{esc}(mg)$$

Es la diferencia entre lo que entra y se escapa

Apéndice D*Cálculo del porcentaje de eficiencia acumulada*

$$\%E_{ac} = \left(\frac{M_{ads}}{M_{al}} \right) * 100$$

Apéndice E*Cálculo de la eficiencia volumétrica temprana*

$$n_{VT_B} = \frac{\int_0^{Vb} (C_0 - C) dV}{C_0 * Vb} * 100$$

Donde:

- $\int_0^{Vb} (C_0 - C) dV$: representa el SDBS total que quedó atrapado
- C_0 : Concentración inicial de SDBS en la entrada
- Vb : Volumen de ruptura

Apéndice F*Cálculo de la eficiencia volumétrica total*

$$n_{VT_total} = \frac{\int_0^{Vs} (C_0 - C_e) dV}{C_0 * Vs} * 100$$

Donde:

- $\int_0^{Vs} (C_0 - C_e) dV$: Masa total adsorbida (área total de remoción)
- C_0 : Concentración inicial de SDBS
- C_e : Concentración del efluente (salida)
- Vs : Volumen de saturación

Apéndice G

Cálculo de la eficiencia global

$$n_G = \frac{M_{ads}}{q_{max} * m} * 100$$

Donde:

- M_{ads} : masa total de SDBS adsorbida [mg]
- q_{max} : Capacidad máxima de adsorción obtenida mediante isotermas [mg/g]
- m : masa del carbón activado [g]

Apéndice H

Cálculo de la pérdida de eficiencia post-lavado

Respecto al ciclo anterior

$$P_{Ef}(\%) = \frac{n_{n-1} - n_n}{n_{n-1}} * 100$$

Respecto al material virgen

$$P_{Ef}(\%) = \frac{n_A - n_n}{n_A} * 100$$

Donde:

- n_n : Eficiencia del ciclo actual
- n_A : Eficiencia del material virgen

Apéndice I

Cálculo de la zona de transferencia de masa

$$ZTM = l_{lecho} * \frac{T_{sat} - T_{rup}}{T_{sat}}$$

Donde:

- l_{lecho} : Altura del lecho adsorbente [cm]
- T_{sat} : Tiempo de saturación [min]
- T_{rup} : Tiempo de ruptura [min]

Apéndice J

Espectros de adsorbancia UV-VIS a diferentes concentraciones de SDBS (curva de calibración)

