

Evaluación de la remoción de surfactantes en aguas de producción mediante el uso de
carbones activados sintetizados a partir de biomasa residual de cacao y café

Andrés Alejandro Pacheco Gómez y Lesly Valentina Contreras Silva

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero de Petróleos

Director

Adan Yovani León Bermúdez

Ph.D. en Ingeniería Química

Codirector

Michell Andrey Jiménez Caballero

M.Sc. en Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A Dios, por las bendiciones y oportunidades que me ha brindado desde que llegué a vivir a Colombia.

A mi mamá, por ser mi guía y la persona que más me apoya en este mundo. Sin sus sacrificios, ganas de salir adelante y esfuerzos por darme una buena vida no estaría aquí. Su amor por mí me ha hecho sentir afortunado todos los días al tener una gran madre.

A mi abuela materna, quién me crió durante mis primeros años de vida y a quién quiero como a una segunda madre. Su apoyo y amor incondicional hacia mí es de gran inspiración.

A mi familia, que han estado ahí para mí y para mi mamá en los momentos más complicados; me han tendido en muchas oportunidades la mano para levantarme y recuperarse de situaciones difíciles. Gracias.

A mi papá, que a pesar de la distancia se ha mantenido apoyándome siempre, desafiándome a que alcance todo mi potencial.

A mi tía Alix, a quién nunca voy a poder agradecer todo lo que hizo por mi mamá y por mí desde que nos vinimos a vivir a Colombia. Dar gracias no basta, pero aun así le digo gracias tía.

Al químico Michell Andrey Jiménez, quién ha sido el mejor codirector del mundo, siempre pendiente de nosotros y encontrando la forma de ayudarnos a mi compañera y a mí en todo momento.

Al doctor Adan Yovani León por su guía y liderazgo durante la realización de este proyecto, la cual nos ha enseñado a mi compañera y a mí desde el primer momento que pisamos el laboratorio para comenzar las pruebas de la investigación.

Al Grupo de Investigación de Corrosión (GIC), por facilitarnos sus instalaciones, equipos y materiales para la realización de las pruebas de la investigación.

A la escuela de Ingeniería de Petróleos y sus profesores, por darme los conocimientos y la pasión por la carrera adquiridos durante estos años.

A mi compañera Valentina, con quién a pesar de conocernos poco, hicimos un gran equipo logrando realizar una investigación de calidad.

A la Universidad Industrial de Santander, por haberme dado la oportunidad de convertirme en un profesional, estudiar una hermosa carrera, haberme ofrecido las herramientas para lograr mis objetivos como profesional y crecer como persona. Gracias UIS

Andrés Alejandro Pacheco Gómez.

Dedicatoria

Principalmente dar gracias a Dios, a Él aludo cada uno de mis pasos y mis logros serán siempre bajo su bendición.

A mis padres, por ser esa voz que siempre me alienta y me recuerda que somos capaces de grandes cosas. Gracias por ser mi fortaleza, por cada sacrificio y por cada muestra de amor, me siento bendecida al saber que tengo unos excelentes padres. Mis logros siempre serán de ustedes.

A mi hermanito, gracias por inspirarme a ser mejor persona, a superarme y a ser el mejor ejemplo para vos, sos mi mejor regalo.

A mi abuela, por siempre confiar en mí y por demostrarme de lo que estamos hechas, te admiro mucho abuelita, esto también es para vos.

A Alejandra, porque a pesar de las circunstancias y la distancia, siempre has sido mi red de apoyo, gracias por estar y permanecer, también tenés tu grano de arena en este proyecto.

A Mariana y a Yoseth, por ser mis grandes amigos, este es un camino que recorrimos por separado, pero nunca aislados. Gracias por estar en mi vida.

A mis amigos Camilo, Cristian, Valentina y Manuela. Qué bonito haber coincidido con grandes compañeros y excelentes amigos como ustedes. Muy orgullosa me siento de cada uno.

Al químico Michell Andrey Jimenez Caballero, nuestro querido codirector. Creo que no podemos estar más agradecidos con tu puesta de empeño y confianza para con nosotros, gracias por siempre estar cuando necesitábamos.

Al doctor Adan Yovani León, por su excelente gestión como director del proyecto. Gracias por cada aprendizaje compartido con nosotros, valoramos mucho cada esfuerzo realizado para que este proyecto saliera adelante de la mejor manera.

A mi compañero Andrés, que fue este proyecto lo que nos juntó y que agradezco enormemente su dedicación para la realización de este.

Al Grupo de Investigación de Corrosión (GIC), por abrirnos las puertas para la realización de este proyecto, ¡mil gracias!

A la escuela de Ingeniería de Petróleos, la gran alma máter, infinitas gracias por cada experiencia y aprendizaje.

A la Universidad Industrial de Santander, gracias por recibirme y acogerme a lo largo de este lindo proceso. Siempre orgullosa de ser UIS.

Lesly Valentina Contreras Silva.

Agradecimientos

A Dios por iluminar nuestro camino y hacer posible la realización de esta investigación.

A nuestras familias, por su apoyo constante durante este proceso.

A la Universidad Industrial de Santander por darnos las herramientas para desarrollarnos como futuros profesionales.

A la Escuela de Ingeniería de Petróleos por su gran aporte a nuestra formación mientras fuimos estudiantes.

Al Grupo de Investigación de Corrosión (GIC) por facilitarnos los equipos para la realización de las pruebas de nuestra investigación.

Al Laboratorio de Hongos que se encuentra en Guatiguará, por su apoyo en la prestación de equipos que se utilizaron en la investigación.

Queremos expresar nuestro profundo agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander (UIS) y a los proyectos Interno VIE-UIS No. 3914 y 3910 por su apoyo en el desarrollo de pruebas, proporcionar recursos y equipos adquiridos por el proyecto, así como facilitar el análisis de FTIR realizado con estos equipos.

Andrés Alejandro Pacheco Gómez y Lesly Valentina Contreras Silva.

Tabla de Contenido

| | |
|--|----|
| Introducción | 15 |
| 1. Objetivos..... | 20 |
| 1.1 Objetivo General..... | 20 |
| 1.2 Objetivos Específicos..... | 20 |
| 2. Fundamentos teóricos y estado del arte | 21 |
| 2.1 Aguas de producción..... | 21 |
| 2.2 Componentes disueltos en las aguas de producción de la industria petrolera..... | 22 |
| 2.3 Métodos físicos para tratar aguas de producción | 24 |
| 2.4 Métodos químicos para tratar aguas de producción..... | 28 |
| 2.5 Tratamiento de aguas de producción en Colombia..... | 32 |
| 2.6 Petróleo y consumo de surfactantes en el mundo | 36 |
| 2.7 Materiales utilizados para la adsorción de contaminantes en aguas residuales | 37 |
| 2.8 Materiales utilizados para la adsorción de surfactantes en aguas de producción | 39 |
| 2.8.1 Carbón activado | 40 |
| 2.9 Activación del carbón | 41 |
| 2.9.1 Activación física | 41 |
| 2.9.2 Activación química..... | 42 |
| 2.10 Reúso del carbón activado | 42 |
| 2.11 Pirólisis..... | 43 |

| | | |
|--------|---|----|
| 2.12 | Análisis de adsorción por método BET | 43 |
| 2.12.1 | Modelo de Langmuir | 44 |
| 2.12.2 | Modelo de Freundlich..... | 44 |
| 2.12.3 | Modelo de Temkin..... | 45 |
| 3. | Materiales y métodos | 46 |
| 3.1 | Materiales y equipos | 46 |
| 3.2 | Metodología experimental | 47 |
| 3.2.1 | Preparación y selección de la biomasa | 48 |
| 3.2.2 | Análisis termogravimétrico | 50 |
| 3.2.3 | Activación del carbón..... | 50 |
| 3.2.4 | Caracterización por espectroscopia FTIR..... | 51 |
| 3.2.5 | Determinación del área superficial por análisis BET | 52 |
| 3.2.6 | Preparación de las disoluciones | 53 |
| 3.2.7 | Proceso de adsorción por análisis espectroscópico UV-Vis..... | 54 |
| 4. | Análisis de Resultados | 56 |
| 4.1 | Rendimiento granulométrico de la biomasa vegetal | 56 |
| 4.2 | Caracterización de la biomasa vegetal | 58 |
| 4.2.1 | Rendimiento del proceso de pirólisis..... | 62 |
| 4.3 | Caracterización de los carbones activados | 63 |
| 4.3.1 | Análisis de superficie específica y determinación de la distribución y tamaño de poro | 63 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.3.2 | Caracterización FTIR para el carbón activado | 67 |
| 4.4 | Caracterización de los surfactantes empleados | 69 |
| 4.5 | Construcción de curvas de calibración (UV-VIS) | 72 |
| 4.6 | Análisis de adsorción | 75 |
| 4.6.1 | Adsorción del T80 en carbón activado | 77 |
| 4.6.2 | Adsorción del RTE en carbón activado | 87 |
| 4.6.3 | Adsorción del SDBS en carbón activado..... | 98 |
| 4.7 | Efecto de la salinidad en la adsorción de surfactantes en carbon activado..... | 108 |
| 4.8 | Análisis de factores en los escenarios de adsorción..... | 110 |
| 5. | Conclusiones..... | 114 |
| 6. | Recomendaciones | 116 |
| 7. | Referencias Bibliográficas..... | 118 |
| 8. | Apéndices..... | 129 |

Lista de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Compuestos disueltos en aguas de producción..... | 23 |
| Tabla 2. Métodos físicos para tratar aguas de producción..... | 25 |
| Tabla 3. Métodos químicos para tratar aguas de producción..... | 28 |
| Tabla 4. Principales tratamientos para el agua de producción en Colombia | 34 |
| Tabla 5. Materiales adsorbentes..... | 38 |
| Tabla 6. Materiales, reactivos y equipos utilizados en la investigación. | 46 |
| Tabla 7. Concentraciones de surfactantes a evaluar. | 53 |
| Tabla 8. Descomposición de los materiales lignocelulósicos de la biomasa vegetal. | 61 |
| Tabla 9. Rendimiento de pirólisis. | 63 |
| Tabla 10. Caracterización BET de los carbones activados sintetizados | 64 |
| Tabla 11. Clasificación por tamaño de poro según IUPAC..... | 67 |
| Tabla 12. Grupos funcionales presentes en los carbones activados..... | 69 |
| Tabla 13. Grupos funcionales presentes en los surfactantes empleados..... | 71 |
| Tabla 14. Parámetros de adsorción del T80 sobre el CA Café 16-30M | 78 |
| Tabla 15. Parámetros de adsorción del T80 sobre el CA 40-50M..... | 79 |
| Tabla 16. Parámetros de adsorción del T80 sobre el CA cacao 16-30M..... | 80 |
| Tabla 17. Parámetros de adsorción del T80 sobre el CA de cacao 40-50M | 81 |
| Tabla 18. Parámetros de adsorción del T80 sobre el CA comercial | 82 |
| Tabla 19. Coeficiente de correlación para la adsorción de T80..... | 83 |
| Tabla 20. Parámetros de las isothermas de Langmuir, Freundlich y Temkin para la adsorción del T80 | 86 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 21. Parámetros de adsorción del RTE sobre el CA café 16-30M | 88 |
| Tabla 22. Parámetros de adsorción del RTE sobre el CA café 40-50M | 89 |
| Tabla 23. Parámetros de adsorción del RTE sobre el CA cacao 16-30M..... | 90 |
| Tabla 24. Parámetros de adsorción del RTE sobre el CA cacao 40-50M..... | 91 |
| Tabla 25. Parámetros de adsorción del RTE sobre el CA comercial..... | 92 |
| Tabla 26. Coeficiente de correlación para la adsorción de RTE..... | 93 |
| Tabla 27. Parámetros de las isothermas de Langmuir, Freundlich y Temkin en la adsorción del RTE..... | 96 |
| Tabla 28. Parámetros de adsorción del SDBS sobre el CA café 16-30M..... | 98 |
| Tabla 29. Parámetros de adsorción del SDBS sobre el CA café 40-50M..... | 99 |
| Tabla 30. Parámetros de adsorción del SDBS sobre el CA cacao 16-30M | 100 |
| Tabla 31. Parámetros de adsorción del SDBS sobre el CA cacao 40-50M | 101 |
| Tabla 32. Parámetros de adsorción del SDBS sobre el CA comercial | 102 |
| Tabla 33. Coeficiente de correlación para la adsorción de SDBS | 104 |
| Tabla 34. Parámetros de las isothermas de Langmuir, Freundlich y Temkin en la adsorción del SDBS..... | 107 |
| Tabla 35. Conductividad de las disoluciones antes y después de la adsorción con CA | 108 |
| Tabla 36. Porcentaje de remoción delo T80 por los CA..... | 111 |
| Tabla 37. Porcentaje de remoción del RTE por los CA..... | 112 |
| Tabla 38. Porcentaje de remoción del SDBS por los CA | 112 |

Lista de Figuras

| | |
|---|-----|
| Figura 1. Metodología experimental del proyecto..... | 48 |
| Figura 2. Tamizadora Gran Test-Pinzuar. | 49 |
| Figura 3. Método de activación del carbón..... | 51 |
| Figura 4. Variables en el montaje. | 54 |
| Figura 5. Rendimiento granulométrico de la cáscara de cacao..... | 57 |
| Figura 6. Rendimiento granulométrico de la cáscara de café. | 58 |
| Figura 7. Termograma de la cáscara de café. | 59 |
| Figura 8. Termograma de la cáscara de cacao. | 61 |
| Figura 9. Curvas de adsorción/desorción de N ₂ de los carbones activados..... | 66 |
| Figura 10. Espectros FTIR de los carbones activados. | 68 |
| Figura 11. Espectros FTIR de los surfactantes empleados. | 70 |
| Figura 12. Curvas de calibración de las disoluciones de surfactantes. | 73 |
| Figura 13. Isotermas de adsorción del T80 según el modelo matemático de Temkin..... | 84 |
| Figura 14. Isotermas de adsorción del RTE según el modelo matemático de Temkin..... | 95 |
| Figura 15. Isotermas de adsorción del SDBS según el modelo matemático de Temkin. | 104 |
| Figura 16. Gráfico de T80 sin sal y con sal. | 113 |

Lista de Apéndices

Apéndice A. Curvas espectro UV-VIS para diferentes concentraciones de surfactantes 129

Glosario

Adsorción: la adsorción se utiliza para eliminar de forma individual los componentes de una mezcla gaseosa o líquida. El sólido recibe el nombre de adsorbente, y el componente que se adsorbe en él se denomina adsorbato.

Biomasa: materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía. Estos recursos biomásicos pueden agruparse de forma general en agrícolas y forestales.

Carbonización: es un proceso de transformación por la cual las sustancias orgánicas, que se encuentran en la corteza terrestre, pueden aumentar sus niveles de carbono; las sustancias, como los fósiles vegetales o animales, pierden lentamente componentes como el hidrógeno, el oxígeno y el nitrógeno, pero ganan carbono.

Surfactantes: son generalmente compuestos orgánicos anfifílicos de tensión superficial, que ejercen una influencia en la zona de contacto creada entre dos fases.

Resumen

Título: Evaluación de la remoción de surfactantes en aguas de producción mediante el uso de carbones activados sintetizados a partir de biomasa residual vegetal de cacao y café*

Autor: Andrés Alejandro Pacheco Gómez, Lesly Valentina Contreras Silva**

Palabras Clave: Adsorción, surfactante, Carbón activado.

La adsorción emplea materiales porosos como los carbones activados, especialmente efectivos en la captura de metales pesados, BTEX, aceites y otros contaminantes. Los carbones activados, derivados de biomasa agroindustrial, son destacados por su ecoeficiencia al reutilizar recursos desechados. Los carbones activados sintetizados en este estudio presentan porosidad mesoporosa y alta eficiencia en la retención de surfactantes de diferente naturaleza. Este estudio presenta un análisis de escenarios que pueden interferir en la eficiencia del proceso como: presencia de salinidad, naturaleza del surfactante, origen, tamaño de grano y el área superficial del grano. Bajo estas condiciones, los carbones activados sintetizados a partir de biomasa residual vegetal de cacao y café resultaron siendo muy efectivos para adsorber los surfactantes T80, SDBS y RTE con un promedio de adsorción de 92,33 % entre los tres tipos de surfactante. Esta tecnología no solo ofrece beneficios ambientales significativos, sino también una alternativa para la implementación de esta agua en proyectos de reinyección, enfocando la economía circular sostenible a esta tecnología prometedora para eliminar tensoactivos en aguas de producción, superando las limitaciones de los métodos convencionales.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Adan Yovani León Bermudez, Ph.D. en Ingeniería Química. Codirector: Michell Andrey Jiménez Caballero, M.Sc. en Química.

Abstract

Title: Evaluation of the removal of surfactants in production waters using activated carbons synthesized from residual plant biomass of cocoa and coffee*

Author(s): Andrés Alejandro Pacheco Gómez, Lesly Valentina Contreras Silva**

Key Words: Adsorption, Surfactants, Activated Carbon.

Adsorption uses porous materials such as activated carbons, which are especially effective in capturing heavy metals, BTEX, oils and other pollutants. Activated carbons, derived from agro-industrial biomass, are noted for their eco-efficiency by reusing discarded resources. The activated carbons synthesized in this study present mesoporous porosity and high efficiency in the retention of surfactants of different nature. This study presents an analysis of scenarios that can interfere in the efficiency of the process such as: presence of salinity, nature of the surfactant, origin, grain size and surface area of the grain. Under these conditions, activated carbons synthesized from residual cocoa and coffee plant biomass were found to be very effective in adsorbing T80, SDBS and RTE surfactants with an average adsorption rate of 92.33 % among the three surfactant types. This technology not only offers significant environmental benefits, but also an alternative for the implementation of this water in re-injection projects, focusing the sustainable circular economy to this technology and promising to remove surfactants in production waters, overcoming the limitations of conventional methods.

* Bachelor Thesis.

** Faculty of Physicochemical Engineering, School of Petroleum Engineering. Director: Adan Yovani León Bermudez, PhD in Chemical Engineering. Co-director: Michell Andrey Jiménez Caballero, M.Sc in Chemistry.

Introducción

En la industria de los hidrocarburos, durante la etapa de producción de un pozo petrolero se obtienen grandes volúmenes de agua provenientes del yacimiento, esta agua producida inicialmente se denomina agua de formación ya que hace relación al agua que se encuentra presente de manera natural en los poros de la formación geológica de donde se realiza la explotación del hidrocarburo; las características de ésta dependerán de las propiedades fisicoquímicas y geoquímicas del yacimiento, como la presencia de contaminantes orgánicos e inorgánicos, salinidad, sólidos disueltos, grasas y aceites, entre otras (Camacho, 2020). No obstante, en algunos escenarios a medida que se realiza la explotación del crudo se requiere la adición de compuestos químicos ya sea por facilidades operativas, o por estimulación para incrementar el crudo producido por medio de métodos de recuperación mejorada, modificando así la composición inicial del agua in situ; de esta manera, estos aditivos se mezclan con el agua de formación a medida que se desplaza el fluido a superficie, donde finalmente el agua captada recibe el nombre de agua de producción (Ortega Ramírez et al., 2019). El agua producida aumenta con la madurez de un campo de petrolero (Morales & Revelo, 2016). En Colombia, la relación de agua/petróleo (RAP) obtenida en superficie fue de aproximadamente 12,45 barriles de agua por cada barril de petróleo recuperado para el año 2015 (Ecopetrol, 2016).

Por tal razón, contar con un tratamiento adecuado para la disposición final de las aguas de producción es un tema importante y de creciente interés en la industria, ya que al considerar los elevados volúmenes de agua que son obtenidos en este tipo de operaciones, es posible deducir que el manejo de este recurso es un parámetro importante para el ámbito ambiental, operacional y económico de un proyecto de extracción de hidrocarburos. Sin embargo, se debe tener en

consideración que el tratamiento de las aguas de producción del petróleo depende de su calidad, rigiéndose por factores como el tipo de fluidos producidos y la presencia de contaminantes en estos.

Actualmente, existen diversas tecnologías que permiten realizar un tratamiento a estas aguas de producción, con el fin de remover los contaminantes y acondicionar el recurso para su disposición final en procesos como la reutilización del agua para métodos de recobro, la preparación de lodos de perforación, el mantenimiento de pozos y vertimientos en aguas superficiales o subterráneas (Camacho, 2020). Entre las tecnologías utilizadas para la remoción de contaminantes presentes en aguas de producción se tienen procesos de adsorción, extracción y oxidación. La oxidación se fundamenta en las reacciones de óxido-reducción tras la participación de agentes oxidantes, como el peróxido de hidrógeno y la luz ultravioleta (UV) para degradar los compuestos contaminantes y descomponer las moléculas orgánicas complejas en otras más sencillas de biodegradar (Bayona, 2023); la extracción hace referencia a las tecnologías que permiten eliminar hidrocarburos dispersos presentes en el agua de producción a partir de la fusión de gotas de estos contaminantes (Mesa et al., 2018). El tratamiento por adsorción se fundamenta en la aplicación de un material adsorbente con una alta área superficial y alta reactividad con los compuestos presentes en el agua producida, que permita la adsorción de los contaminantes en la superficie del sólido adsorbente (Castro, 2004). Entre los adsorbentes más empleados en la industria para este tipo de prácticas se tienen las arcillas orgánicas, alúmina activada, zeolitas y, con un creciente interés actual, los carbones activados; materiales con gran potencial de remoción de altas concentraciones de metales pesados, Carbono Orgánico Total (TOC), presencia de compuestos orgánicos volátiles como Benceno-Tolueno-Etilbenceno-

Xilenos (BTEX) y aceite; aplicables para cualquier tipo de agua producida, independientemente de las concentraciones totales de sólidos disueltos (TDS) y sal (Igunnu & Chen, 2012).

De tal forma, considerando que el propósito principal del tratamiento de las aguas de producción debe estar encaminado al uso de prácticas ecoeficientes que permitan cumplir con los parámetros establecidos por la normatividad vigente en cuanto a la disposición y tratamiento de aguas residuales y, a su vez, se adapten a las necesidades y requisitos de la industria, se plantea la idea de estudiar otras alternativas que permitan obtener resultados favorables en el tratamiento de las aguas de producción, específicamente en aguas provenientes de procesos de inyección de surfactantes, partiendo del aprovechamiento de recursos existentes que no generen mayor coste al tratamiento convencional y que aseguren una remoción eficaz de contaminantes.

En los últimos años, las organizaciones departamentales y territoriales enfocadas con la autosuficiencia agropecuaria han despertado un creciente interés por la implementación de la economía circular en subproductos de residuos agro-industriales que puedan generar valor para el mercado y, a su vez, mitigar el impacto ambiental generado por su desecho debido a que en Colombia, en el último año, se registraron aproximadamente 218 millones de toneladas de residuos agrícolas a partir de cultivos representativos. La Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) en septiembre del 2023 anunció el lanzamiento del proyecto “*Santander siempre circular*” con el cual se pretende dar una propuesta de valor y de manejo a la gran cantidad de residuos sólidos orgánicos derivados de la cosecha del cacao y del café generados en el departamento de Santander, al ser este el principal productor de cacao en el país y uno de los mayores productores de grano de café. Con base en lo anterior, se indaga en una propuesta de valor aplicada a la industria de los hidrocarburos, como lo son las tecnologías emergentes para el tratamiento de aguas de producción, partiendo del propósito de generar un

proyecto que vincule la mencionada economía circular y genere un aporte significativo para ambas industrias aprovechando las particularidades proporcionadas por los sólidos residuales industriales como potenciales precursores de materiales adsorbentes de posibles contaminantes.

Así pues, la producción de carbón activado (CA) a partir de biomasa residual de cacao o de café, podría implementarse como tecnología de remoción de surfactantes, teniendo en cuenta la alta área superficial que presentan los CA (León et al., 2021), los bajos costos en su fabricación y la posibilidad de reutilización a partir de tecnologías de extracción líquido-líquido para la remoción de los contaminantes y limpieza de los carbones activados.

Por consiguiente, desde un enfoque de investigación aplicada, en el presente proyecto se dio respuesta a la pregunta de investigación: *¿En qué medida los carbones activados demuestran ser eficaces como materiales adsorbentes para la remoción de surfactantes en las aguas de producción?*, a partir de los resultados obtenidos de la aplicación de los materiales adsorbentes a partir de biomasa residual vegetal, como un método admisible para el tratamiento de aguas de producción provenientes de inyección de surfactantes en proyectos de recobro mejorado de campos petroleros, fundamentando su aplicación como una opción sostenible y económica que implementa recursos renovables y prácticas ecoeficientes dentro de la industria de los hidrocarburos.

Para llevar a cabo la investigación, este trabajo se ha estructurado en 6 capítulos. En el capítulo I “Objetivos” se exponen los objetivos y metas propuestas para la realización del trabajo de investigación. En el capítulo II “Fundamentos teóricos y estado del arte” se efectúan algunas precisiones teórico-conceptuales sobre los materiales adsorbentes, su aplicación e importancia en el tratamiento de aguas de producción de la industria del petróleo y los modelos de adsorción que permiten establecer la eficiencia del procedimiento. Asimismo, se muestran algunas

investigaciones realizadas a nivel internacional y nacional que permiten sustentar la aplicabilidad de estos precursores orgánicos para la síntesis de carbones activados con beneficiosas características texturales y fisicoquímicas. Mientras que, en el capítulo III “Materiales y métodos” se hace una descripción de todo el proceso metodológico que se realizará en la experimentación, como los métodos de elaboración, caracterización y evaluación de la eficiencia de remoción de los carbones activados obtenidos, partiendo de la naturaleza de los surfactantes empleados en los modelos a estudiar. En el capítulo IV “Resultados y análisis” se realiza la presentación detallada de los resultados y se estudia cada uno de ellos, teniendo en cuenta conceptos y referencias bibliográficas. Finalmente, en los capítulos V “Conclusiones” y VI “Recomendaciones” se presentan las conclusiones del trabajo de investigación y se proponen algunas recomendaciones y lineamientos para futuros desarrollos alrededor de este tema.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar la remoción de surfactantes en aguas de producción mediante el uso de carbones activados sintetizados a partir de biomasa residual vegetal de cacao y café.

1.2 Objetivos Específicos

Identificar los materiales adsorbentes utilizados para la remoción de surfactantes en las aguas de producción de la industria petrolera mediante revisión bibliográfica.

Sintetizar carbones activados a partir de la biomasa residual de cáscara de cacao y de café para el proceso de adsorción de surfactantes en aguas residuales.

Determinar las propiedades texturales y fisicoquímicas de los carbones activados sintetizados mediante pruebas analíticas contempladas como espectroscopia de infrarrojo, análisis termogravimétrico y pruebas de área superficial, entre otras.

Evaluar la eficiencia de los carbones activados sobre la remoción de surfactantes de diferente naturaleza usando la técnica UV-VIS e isothermas de adsorción, para su potencial aplicación en el tratamiento de aguas de producción.

2. Fundamentos teóricos y estado del arte

2.1 Aguas de producción

El agua de producción se refiere a aquella obtenida junto con el petróleo y el gas mientras se produce un pozo petrolero, proveniente del agua de formación o como producto del agua inyectada como método de recobro. Por esto, de acuerdo con su naturaleza, este tipo de agua generalmente contiene sólidos suspendidos, contenido de sales, metales pesados, compuestos orgánicos solubles e insolubles y, a su vez, contienen compuestos químicos si es el caso de que se hayan empleado en un proceso de inyección de recobro mejorado (Ortega Ramírez et al., 2019).

La calidad del agua de producción se asocia con el tipo de hidrocarburo producido, la zona donde se realiza la extracción, las características geológicas de la formación del yacimiento, entre otros aspectos (Al-deen Atallah Aljuboury et al., 2017). Usualmente, entre los principales compuestos que se encuentran en las aguas de producción se tienen: aniones como sulfatos, carbonatos y bicarbonatos; cationes como estroncio, bario, cadmio, cromo, plomo, mercurio, magnesio, sodio y hierro; grasas y aceites dispersos como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) como el benceno, tolueno, xileno y naftalenos; y gases como oxígeno (O_2), cloro (Cl_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S) (Mesa et al., 2018).

Para el tratamiento de aguas de producción es necesario llevar a cabo un pretratamiento del agua, el cual elimina las impurezas suspendidas, los sólidos, los coloides y los organismos del agua cruda para garantizar la calidad del agua antes del proceso de separación de la membrana; estos pueden ser la implementación de un aliviadero, pozos de gruesos, desbaste, tamizado, desarenados y desengrasados. Las depuradoras se incluyen en todas las plantas de

tratamiento independientemente del uso del agua y suele ser un método físico antes de que entre el agua. El tratamiento primario, su objetivo es reducir los sólidos en suspensión y también, en cierta medida, reducir la demanda química de oxígeno, ya que estos sólidos son principalmente materia orgánica. Existen procesos como la sedimentación o decantación primaria, así como la flotación a través de aire disuelto y otros procesos como la floculación o la coagulación. Para el tratamiento secundario, se llevan a cabo procesos biológicos con células en suspensión (lagunas, lodos, digestores anaeróbicos) o con procesos de membranas fijas o adherentes (lechos bacterianos, biodiscos, filtros sumergidos). Se considera la operación de una planta de tratamiento de aguas residuales no tradicional después de realizar este último proceso. En el tratamiento terciario se realiza un proceso adicional en las llamadas plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) diseñadas para eliminar contaminantes residuales en estado suspendido o coloidal, promoviendo la reutilización del agua de producción para procesos de reinyección (Peña, 2023).

Sin embargo, la escogencia del método a utilizar depende en gran medida de la eficiencia de remoción dependiendo del tipo de contaminante presente, accesibilidad, viabilidad económica y metodología.

2.2 Componentes disueltos en las aguas de producción de la industria petrolera

El agua de producción posee numerosos componentes considerados complejos, los cuales se pueden catalogar como compuestos orgánicos e inorgánicos, aceites disueltos y dispersos, grasas, metales pesados, radionúclidos, productos químicos de proceso, sólidos de formación, sales, gases disueltos, productos de incrustaciones, ceras, microorganismos y oxígeno disuelto

(Hayes y Arthur, 2004; Igunnu & Chen, 2012). En la Tabla 1 se presentan los diferentes compuestos disueltos en las aguas de producción con sus respectivas características.

Tabla 1.

Compuestos disueltos en aguas de producción.

| Compuesto | Características |
|------------------|--|
| Materia orgánica | La cantidad de material orgánico total en las aguas de producción varía entre menos de 0,1 y más de 11.000 mg/L, la mayoría de los cuales son mezclas de ácidos carboxílicos de bajo peso molecular como los ácidos fórmicos, acético, propanoico, butanoico, hexaico y pentanoico (Neff, 2002). |
| Sólidos | Los sólidos con aniones de cloruro (Cl^-) y cationes de sodio (Na^+) son los más predominantes en las aguas de producción, siendo esta una de las razones por la cual el agua del mar se asemeja a las aguas de producción en cuanto a salinidad. Igualmente, se encuentran otro tipo de cationes como litio (Li^+), aluminio (Al^{3+}), estroncio (Sr^+), potasio (K^+), bario (Ba^{2+}) en proporciones pequeñas y hierro (Fe^+), magnesio (Mg^+), calcio (Ca^+) en proporciones más altas. Entre los aniones que se encuentran están los sulfatos (SO_4), carbonato (CO_3) y bicarbonato (HCO_3) (Neff, 2002). |
| Aceites | Entre los aceites encontrados en el agua de producción se encuentran los hidrocarburos saturados y aromáticos. Los compuestos monoaromáticos son los que se encuentran en mayor proporción, como benceno, etilbenceno, xilenos y tolueno. En cuanto a los compuestos poliaromáticos, |

estos representan una mayor toxicidad y persistencia en el medio marino (Neff, 2002).

Metales pesados Los metales pesados aparecen en las aguas de producción en concentraciones más elevadas que en el agua de mar. Entre estos se encuentran el bario, hierro, zinc, mercurio y manganeso (Neff, 2002).

Compuestos químicos Los compuestos químicos que se encuentran en las aguas de producción pueden provenir de diversos orígenes, aunque principalmente es por obra de las operaciones petrolíferas; estos productos químicos se usan mayormente para inhibir la corrosión, la formación de hidratos, prevención de incrustaciones, la producción de espuma y el crecimiento bacteriano (Igunnu y Chen, 2012).

Gases Entre los gases disueltos en las aguas de producción se encuentran el oxígeno (O₂), el dióxido de carbono (CO₂), y el sulfuro de hidrógeno (H₂S), que se manifiestan de forma natural debido a reacciones de bacterias o por reacciones químicas en el agua de producción (Igunnu y Chen, 2012).

2.3 Métodos físicos para tratar aguas de producción

Estos tratamientos no crean nuevas sustancias, sino que concentran los contaminantes evaporando el agua o filtrando sólidos de tamaño significativo (Salamanca, 2016). En la Tabla 2 se presentan varios tratamientos físicos en la industria de los hidrocarburos.

Tabla 2.

Métodos físicos para tratar aguas de producción.

| Tecnologías | Contaminante objetivo | Características |
|-------------|---|--|
| Adsorción | Manganeso, hierro, TOC, BTEX, petróleo, metales pesados | <p>Proceso de transferencia de masa, a través del cual las sustancias del líquido se transfieren al medio sólido. Esta es una de las operaciones agregadas más efectivas para lograr una mejor calidad del agua, ya que es capaz de reducir la concentración de contaminantes a niveles muy bajos y hasta el 80% de metales pesados. Una de las desventajas de este método es el costo de instalación y mantenimiento del sistema, pero se puede solucionar utilizando adsorbentes más baratos, como conchas y carbón activado, que pueden hacer que el proceso sea más competitivo. Los filtros de cáscara de nuez funcionan con ciclos de proceso de filtración y retrolavado (Al-Ghouti et al., 2019; Jiménez et al., 2018; Worch, 2012).</p> |
| Ciclones | Arena y petróleo | <p>Los hidrociclones se utilizan para separar compuestos como arena y petróleo presentes en los flujos de producción en función de diferencias de densidad. Se puede eliminar partículas entre 5 y 15 μm de diámetro; los componentes solubles en agua no se pueden</p> |

| | | |
|--------------------|--|---|
| | | <p>eliminar. El agua resultante contiene una gran cantidad de materia en suspensión y pequeñas gotas de aceite, así como de tensioactivos. Entre las ventajas de este tipo de equipos son su larga vida útil y la innecesidad de pretratamientos químicos o de agua de alimentación. Una gran desventaja de esta tecnología es la creación de una gran cantidad de residuos sólidos en suspensión ya que los compuestos disueltos no se pueden eliminar (Heydari et al., 2013; Igunnu y Chen, 2012; Nasiri y Jafari, 2017).</p> |
| | | <hr/> <p>La evaporación se utiliza como tratamiento para recuperar o separar sustancias valiosas o peligrosas. Su</p> |
| Evaporación | <p>Metales pesados, aguas residuales oleosas y saladas</p> | <p>robustez evita otro proceso físico o químico posterior, ya que la adición de calor latente al agua de alimentación crea vapor que se condensa en agua pura (Al-Ghouti et al., 2019; Mesa et al., 2018; Pankratz, 2000).</p> |
| | | <hr/> <p>La flotación por aire disuelto (DAF) es un proceso que</p> |
| Flotación mejorada | <p>Partículas finas, partículas coloidales ultrafinas, sedimentos orgánicos e</p> | <p>puede eliminar eficazmente diversos contaminantes. A alta presión, el aire se disuelve en el saturador y se forman microburbujas cuando se expulsa agua a presión atmosférica en la celda de flotación. Las microburbujas se unen a las partículas del agua de producción y</p> |

| | |
|---|--|
| inorgánicos, emulsiones iónicas, microbianas, proteicas, aceite en agua y aceites dispersos | aumentan así su flotabilidad, llevándolas a la superficie. Las ventajas de este proceso son alta capacidad de tratamiento (100 ~ 600 m ³ /h), tamaño reducido, excelente calidad del efluente, lodos espesos y rápido inicio. Sin embargo, una de las desventajas es que puede tener un alto consumo y altos costos operativos (Al- Shamrani, 2002; Azevedo et al., 2018). |
| Electrodiálisis Solidos disueltos totales | La electrodiálisis (ED) es una tecnología de separación electroquímica impulsada por cargas en la que las sales disueltas en el agua producida son cationes y aniones que pueden unirse a electrodos específicos de carga opuesta. Este método es adecuado para la recuperación de agua producida con bajas concentraciones de TDS, pero se tienen pocas posibilidades de que sea rentable y económicamente competitivo para el tratamiento de agua producida concentrada, al igual que otras separaciones con membranas, el costo de los electrodos y las membranas es elevado y su vida útil es corta (Fakhru'l-Razi et al., 2009; Nasiri et al., 2017; Xu y Huang, 2008). |

2.4 Métodos químicos para tratar aguas de producción.

En los procesos que involucran el uso de químicos para el tratamiento de aguas de producción se producen nuevas sustancias como resultado de reacciones químicas, reduciendo así la presencia de compuestos contaminantes en el agua de producción (Salamanca, 2016). En la Tabla 3 se muestran los diferentes tratamientos químicos utilizados actualmente en la industria.

Tabla 3.

Métodos químicos para tratar aguas de producción.

| Tecnologías | Contaminante objetivo | Características |
|--------------------------|--------------------------------------|--|
| Precipitación química | Componentes iónicos, metales pesados | La precipitación química se utiliza para eliminar componentes iónicos en agua agregando contraiones para disminuir la solubilidad. La eficiencia del proceso depende de la concentración del metal iónico en la disolución, el precipitante utilizado y otros componentes que puedan inhibir la reacción de precipitación (Oncel et al., 2013; Xiao et al., 2005). |
| Procesos electroquímicos | Materia disuelta | Un reactor electroquímico es un dispositivo que utiliza corriente eléctrica para transformar poderosamente materiales. La oxidación se produce en el ánodo y la reducción se produce en el cátodo. El proceso se basa en mejoras en las reacciones químicas que implican la producción o uso de electricidad. En comparación con |

otros métodos de tratamiento utilizados actualmente para la producción de agua, la electroquímica es una tecnología ecológica y económica. Asimismo, no se generan residuos secundarios ni se requiere el uso de productos químicos adicionales y proporcionar agua producida tratada de mejor calidad para un uso productivo. Los procesos electroquímicos más distinguidos son la electrodeposición, la electrocoagulación, la electro-flotación y la electro-oxidación (Muddemann et al., 2019; Jiménez et al., 2018; Gilpavas, 2008).

Demulsificantes

Emulsiones de
 aceite en agua

La demulsificación química es un proceso que se utiliza para tratar emulsiones de aceite en agua e implica el uso de aditivos químicos para acelerar el proceso de demulsificación. Los tensioactivos estabilizan las emulsiones aceite-agua reduciendo la tensión interfacial junto con el potencial zeta de la superficie de la gota de aceite. Los desemulsionantes comerciales son tensioactivos poliméricos tales como copolímeros de poli (óxido de etileno) (PEO) y poli (óxido de propileno) (PPO), así como resinas de alquilfenol-formaldehído o mezclas de diversos tensioactivos (Abdurahman et al., 2007; Jiménez et al.,

| | | |
|------------------------------|--|--|
| | | 2018; Al-Sabagh et al., 2011). |
| Intercambio iónico | Aguas saladas | Las membranas de intercambio iónico son un tipo de películas poliméricas densas que soportan cargas fijas en la matriz polimérica. Estas membranas permiten el paso selectivo de iones con carga opuesta (contraiones) mientras bloquean iones con carga similar (coiones). Este proceso se reconoce como un componente clave en la desalinización y la electrólisis (Luo et al., 2018). |
| Oxidación química | Aguas residuales con compuestos refractarios. Hidrocarburos, color, olor, DQO y DBO | La oxidación química es un proceso que ocurre gracias a la transferencia de electrones del agente oxidante a la especie química oxidada. En la actualidad, se están desarrollando métodos de tratamiento del agua de producción para reducir los hidrocarburos, además de eliminar color, olor, DQO y DBO en el agua producida. Los métodos de separación tradicionales no pueden eliminar los compuestos orgánicos disueltos, por lo que se deben realizar una variedad de oxidaciones, incluidas oxidaciones biológicas y químicas (Renou et al., 2008; Shammam et al., 2005; Jiménez et al., 2018; Shokrollahzadeh et al., 2012). |
| Con peróxido de hidrógeno | Compuestos orgánicos | El peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) es un oxidante potente que reacciona directamente con compuestos |

| | | |
|--------------------|---|---|
| | | <p>orgánicos que se encuentran en el agua de proceso.</p> <p>Cuando se utiliza en combinación con otras fuentes de energía o reactivos (oxidación mejorada) puede mejorar su eficacia y así actuar como oxidante al descomponer los peróxidos en radicales hidroxilos (Jiménez et al., 2018).</p> |
| Con ozono | <p>Productos químicos orgánicos incluidos hidrocarburos aromáticos policíclicos</p> | <p>El ozono (O₃) es uno de los oxidantes con mayor efectividad y se ha utilizado en el tratamiento del agua potable para la desinfección, desodorización, eliminación del color húmico y degradación de diversos productos químicos orgánicos, incluidos los HAP (hidrocarburos aromáticos policíclicos) desde hace muchos años. La ozonización es un proceso gradual en el que los átomos de oxígeno se introducen gradualmente en los compuestos, dando como resultado moléculas más pequeñas con un mayor porcentaje de oxígeno en su estructura química en forma de grupos funcionales hidroxilo, carboxilo o aldehído, por tanto, se vuelven más propensos a la biodegradación (Gong y Zhao, 2017; Alvares et al., 2001).</p> |
| Oxidación avanzada | Contaminantes orgánicos e | <p>En este proceso se formará una cantidad suficiente de radicales hidroxilos (OH[•]) que, debido a su reactividad</p> |

inorgánicos y alta selectividad, son capaces de transformar diversos contaminantes orgánicos e inorgánicos, inhibiendo así su posterior generación de residuos tóxicos. En estos procesos, dejando a un lado la simple ozonización (O₃), la mayoría de estos procesos utilizan oxidantes fuertes, radiaciones ultravioletas (UV), ultrasonidos (US) o haces de electrones y catalizadores, entre otros. Los sistemas de oxigenación avanzados más comunes son: O₃/UV, H₂O₂/UV, rayo de electrones, ultrasonido (US), H₂O₂/US, UV/US, H₂O₂/Fe²⁺/UV (fotofenton), O₃/H₂O₂, O₃/OH, H₂O₂/Fe²⁺ (Fenton), entre otros (Deng y Zhao, 2015; Mesa et al., 2018; Renou et al., 2008).

2.5 Tratamiento de aguas de producción en Colombia

En Colombia, el tratamiento del agua de producción se centra en procesos físicos y químicos tradicionales como desnatado, flotación por aire disuelto, filtración, oxidación química, etc. Hasta la fecha, no se han desarrollado sistemas de tratamiento avanzados no convencionales que incluyan nuevas tecnologías o configuraciones integradas, como sistemas híbridos que constan de dos procesos diferentes, que, cuando se integran en un solo proceso, pueden aumentar significativamente la eficiencia y operatividad del tratamiento de purificación del agua (Vicuña et al., s.f.).

Actualmente, se están llevando a cabo estudios sobre cómo se puede utilizar el agua de producción para fines estratégicos, siendo la reinyección de agua el uso más propicio y lo que se efectúa en la industria de hidrocarburos en la actualidad. En la industria petrolera en Colombia, el mayor volumen de agua producida se designa para disposición subterránea, también llamada disposal, con un 58,2% para este propósito; en el 2016, se utilizaron 120.03 millones de m³ en volumen de agua para disposición subterránea y 50,94 millones de m³ en volumen de agua para reinyección (Ecopetrol, 2016). La reinyección y la disposición subterránea se realizan mediante los mismos pozos petroleros que se utilizan para extraer hidrocarburos. La disposición subterránea tiene como objetivo verter agua en el acuífero confinado y garantizar que no haya contacto entre el volumen de agua inyectado y las áreas de interés. Se lleva a cabo en formaciones subterráneas profundas y aisladas de formaciones productoras. En cuanto a la reinyección, para mantener la presión en las formaciones productoras, esta se lleva a cabo a través de formaciones que están conectadas hidráulicamente a la formación productora (Alconsult International, 2005).

Según Ecopetrol, en 2020 se necesitó un total de 147,6 millones de metros cúbicos de agua para llevar a cabo las actividades operacionales de su cadena de valor. De esta cantidad, el 65% (96,5 millones de metros cúbicos) se obtuvo mediante la reutilización de aguas residuales y de producción, mientras que el 35% restante (51 millones de metros cúbicos) provino de fuentes naturales y de compras a acueductos; esto resalta la importancia de tener tratamientos eficaces para las aguas de producción recuperadas, asegurando su reutilización exitosa y manteniendo su calidad.

En Colombia, las empresas del sector oil & gas tratan el agua producida eliminando principalmente el aceite, sólidos, DBO5 (Demanda Bioquímica de Oxígeno), DQO (Demanda

Química de Oxígeno) y temperatura para su vertido o reinyección (Camacho, 2020). Los procesos varían según el campo y el uso final del agua, sin embargo, algunos métodos y equipos comunes incluyen los mostrados en la Tabla 4.

Tabla 4

Principales tratamientos para el agua de producción en Colombia

| Proceso / Equipo | Descripción | Referencia |
|---------------------|--|--|
| Separadores | Son el punto de control inicial en las estaciones de recolección en los campos. Funcionan reteniendo la mezcla de fluidos durante un período, lo que permite que, mediante gravedad y fuerzas centrífugas, se separen los componentes dispersos. Los equipos más utilizados son el separador de agua libre (FWKO, free water knockout), que elimina el agua libre de la mezcla de hidrocarburos, y el separador API, que elimina grandes cantidades de aceites y sólidos disueltos del agua producida. | (Abdel et al., 2013; Carmona, 2015) |
| Desnatadores | Funciona por medio de la flotación, donde las partículas más ligeras, como las grasas y aceites, ascienden a la superficie debido a su menor densidad en comparación con el agua. Estos sólidos flotantes son entonces removidos de la superficie mediante rasquetas o mecanismos similares, mientras que el agua tratada pasa a la siguiente etapa del proceso de tratamiento. | (Camacho 2020; Khatib & Verbeek, 2002) |

Piscinas Tienen múltiples aplicaciones, como sedimentación y biodegradación, y usan oxígeno atmosférico y fotosíntesis de algas. Pueden reducir hasta un 80% de DBO, aunque la eficiencia varía con el tipo de materia orgánica, pH y régimen hidráulico. También disminuyen la DQO mediante recirculación y aireación por aspersión.

(Camacho 2020;
Petrocolombia,
2018)

Filtros Se emplean como tratamientos físicos y de membrana para eliminar sólidos suspendidos y otros contaminantes del agua. Los filtros para sólidos suspendidos incluyen los de bolsas, cartuchos de algodón y palma africana. Para reducir aceites y grasas, se utilizan filtros de cáscara de nuez, que pueden eliminar hasta el 98% de las partículas mayores de 2 micrones. Los filtros de carbón activado se utilizan para controlar las sustancias orgánicas e inorgánicas.

(Camacho 2020;
Mansarovar Energy,
2018)

Para establecer cuál método es el más adecuado, se deben evaluar los diferentes parámetros operacionales y las características del yacimiento como el tipo de la roca, el tipo de fluido en base a su viscosidad, movilidad, miscibilidad y saturaciones, y, los mecanismos de desplazamiento, movimiento de fluidos, eficiencia de barrido, entre otros (Niño y Gómez, s.f.).

2.6 Petróleo y consumo de surfactantes en el mundo

El mercado de los tensioactivos es dinámico gracias a la diversidad de nuevos productos y al descubrimiento de nuevas aplicaciones, lo que ha llevado a un crecimiento continuo durante el último siglo, siendo especialmente notable entre 1988 y 2000, cuando el consumo casi se cuadruplicó, pasando de 7,5 millones de toneladas a 11 millones de toneladas, esperándose que el mayor crecimiento se produzca en los tensioactivos utilizados en productos químicos y cosméticos para el cuidado personal; en América del Sur, se prevé que el crecimiento aumentará un 4,8% anual. Otras aplicaciones, como adhesivos y lubricantes, representarán el 11% del consumo mundial. En el futuro, se espera que la industria de los surfactantes siga creciendo hasta el punto de que los países en desarrollo adopten estándares de higiene en los EE. UU., Europa y Japón, alcanzando un volumen global de 18 millones de toneladas para 2050 (CESIO, 2020).

Los surfactantes al ser compuestos tensioactivos que poseen propiedades fundamentales de adsorción y asociación han hecho que en diversas industrias sean implementados y saquen provecho de estas características químicas. No obstante, en la industria petrolera se han implementado estos agentes tensioactivos para prácticas de recobro mejorado, cuyo fin es aumentar la producción de petróleo de un pozo mediante la inyección de químicos, en este caso los surfactantes, los cuales actúan para disminuir la tensión interfacial entre el agua y el crudo presentes en la formación y de esta manera, facilitar el desplazamiento del crudo y generar un banco de aceite dispuesto a producirse de manera más eficaz (Dordzie & Dejam, 2021). Su capacidad para adsorberse a la interfase de dos fluidos ocurre por la doble afinidad que poseen los surfactantes al ser moléculas anfifílicas, puesto que, al ser retenida en la interfase agua/crudo, la molécula de surfactante se orienta de manera que su cabeza polar se sitúa en el agua, mientras que el extremo apolar se dispone fuera de esta. Según Massarweh & Abushaikha (2020), este es

un fenómeno de carácter espontáneo que permite reducir la tensión entre dos fases inmiscibles gracias a la disminución de la energía libre del surfactante al ubicarse en la interfase para satisfacer su doble afinidad; donde la disminución de la tensión genera una mayor deformación en la interfase, provocando un aumento en la movilización del aceite residual.

Sin embargo, el rendimiento del tensioactivo depende de la naturaleza de su carga; estos pueden ser iónicos, con carga positiva (catiónicos) o con carga negativa (aniónicos), o en su defecto, pueden ser no iónicos al no presentar ningún tipo de carga en su extremo polar. De esta manera, el tipo de surfactante a usar dependerá de los requerimientos del pozo y de los resultados que se esperen obtener.

2.7 Materiales utilizados para la adsorción de contaminantes en aguas residuales

La adsorción es un fenómeno donde ocurre una acumulación de sustancias en la superficie de un material (Flores, 2013). El material removido se conoce como adsorbato y el sólido se le conoce como adsorbente. En este fenómeno existe una fuerza llamada gradiente de concentración, la cual transporta los adsorbatos al adsorbente hasta hallar el equilibrio, esto significa que las fuerzas de desorción y adsorción sean iguales. Asimismo, para hallar la capacidad de adsorción de cualquier material se pueden realizar experimentos para encontrar semejanza entre el adsorbente y el adsorbato, por lo que las isotermas de adsorción son necesarias (García, 2009).

Por otro lado, diferentes materiales como el carbón activado, las zeolitas, alúmina activada y las resinas poliméricas se han usado para la remoción de contaminantes orgánicos en el agua (Flores, 2013).

Tabla 5.

Materiales adsorbentes

| Materiales | Descripción | Referencia |
|---------------------|---|---------------------------|
| Zeolitas | <p>Forman cavidades con cationes grandes y moléculas de agua con una gran libertad de movimiento que permiten la deshidratación reversible y el intercambio iónico, son aluminosilicatos de la familia de los tectosilicatos. Son microporosas, hidratadas y altamente cristalinas. Las zeolitas debido a sus propiedades texturales se utilizan en la adsorción de contaminantes en el suelo y en la limpieza de aguas; siendo en las aguas de producción efectivas al adsorber sustancias como lo son los surfactantes.</p> | (Granada et al., 2006) |
| Alúmina activada | <p>Cuando existen varios contaminantes en el agua, se recomienda utilizar alúmina activada; se ha demostrado que elimina el flúor, el arsénico y el selenio. Otros iones inorgánicos como el radio, el cadmio, el cromo, el plomo, el mercurio, el nitrato, la plata y el bario se adsorben sobre la alúmina pero en menor medida. Las alúminas activadas y su alta capacidad de remoción de compuestos contaminantes en aguas residuales representan un aliado para la adsorción de surfactantes.</p> | (Aparna et al., 2004) |

Nano compuestos Los nano compuestos son usados como una forma de reducir en el 50% los hidrocarburos emulsionados durante los primeros 100 minutos en que entra en contacto el material y el hidrocarburo. (Villegas et al., 2017)

Carbón activado Los carbones activados son los más utilizados debido a su elevado volumen micro y mesoporoso, así como también por su gran área específica. La preparación de materia prima, la carbonización a baja temperatura, y la activación de los carbones activados son fundamentales para el cuidado de propiedades fundamentales como la estructura de poros y la resistencia mecánica. El carbón activado se puede concebir con la utilización de materiales como cáscara de coco, huesos, turba, madera, coque de petróleo, entre otros. (Yang, 2003)

2.8 Materiales utilizados para la adsorción de surfactantes en aguas de producción

La creación de carbones activados a partir de desechos agroindustriales como la cáscara de naranja, una fuente renovable, tiene múltiples beneficios; se pueden utilizar los residuos de las cáscaras de naranja aumentando su valor agregado, haciendo posible la adquisición y creación de carbones activados a un costo menor, igualmente disminuyendo las importaciones (García y Granillo, 2017). Por su alto contenido en carbono, bajo contenido de cenizas y alta capacidad de intercambio catiónico, la cáscara de naranja puede ser considerada como materia prima para la producción de carbón activo (Pinzón y Cardona, 2010).

La cáscara de coco se presenta como una materia prima interesante para obtener carbón activado con alta eficiencia de remoción de contaminantes en aguas. Para la activación de cáscaras de coco a alta temperatura (800°C) en presencia de vapor es posible obtener carbono hidrófilo con microporos (ultramicroporos <0,7 nm de diámetro), los cuales son adecuados para aplicaciones de separación de gases, pero hidrófilos cuando se activan a temperaturas más bajas (450 °C) utilizando reactivos químicos como ácido fosfórico o cloruro de zinc con poros más anchos (mesoporos > 2 nm) adecuado para aplicaciones en fase líquida (Reinoso, 2005). El uso de la cáscara de coco representa una alternativa viable y atractiva como una forma de adsorber surfactantes en aguas de producción.

2.8.1 Carbón activado

Se denomina carbón activado a una serie de productos obtenidos a partir de la carbonización de un material o precursor orgánico con el objeto de establecer una óptima estructura porosa interna y una gran área superficial; no obstante, estas características son dependientes de la naturaleza de la materia prima utilizada para su generación y de las condiciones de su activación, donde éste último término hace referencia a un proceso mediante el cual se busca incrementar la estructura porosa del material (Luna et al., 2007). Por consiguiente, el carbón activado se ha posicionado como un sólido material absorbente en diversas industrias, ya que dada su prominente superficie interna es posible retener diversos compuestos (adsorbatos) en los canales porosos de su estructura. Su obtención puede realizarse a partir de diferentes fuentes de biomasa, pero el paulatino interés por la aplicación de estos materiales en diversas áreas ha llevado a analizar el uso de residuos agroindustriales para su obtención, tales como cáscara de cacao, cáscara de café y cáscara de nuez.

Los carbones activados son por lo general hidrofóbicos, pero cuando se encuentran enlaces carbono-oxígeno aumenta su hidrofilidad, debido a que los átomos más electronegativos de la superficie del carbono tienen mayor influencia en las moléculas de agua por los puentes de hidrógeno (Velázquez, 2014). El carbón activado se vuelve más hidrofílico debido a los grupos de ácidos oxigenados que le otorgan un carácter polar; entre estos grupos se encuentran los fenólicos, los carboxílicos y los lactónicos, mientras que los grupos oxigenados básicos como los éteres, carbonilos, cromenos y pironas, proveen al carbón activado de un carácter hidrofóbico, por lo que la adsorción de moléculas orgánicas de baja polaridad se ve beneficiada (Flores, 2013; García, 2009; Velázquez, 2014).

2.9 Activación del carbón

El proceso de activación se puede realizar mediante activación física (llamada también activación térmica) o mediante activación química.

2.9.1 Activación física

Este procedimiento se fundamenta en la carbonización del precursor a temperaturas elevadas, con el objeto de eliminar los compuestos volátiles presentes y posteriormente, crear una estructura porosa inicial en el material carbonoso resultante debido al reordenamiento de los átomos de carbono en estructuras microcristalinas (U Sevilla, 2011). No obstante, es necesario someter el carbón primario a un proceso de activación para aumentar su grado de porosidad y el área específica, lo cual consiste en hacer reaccionar los átomos de carbono con un agente oxidante (activante) a una temperatura constante; algunos agentes activantes pueden ser aire, vapor de agua, CO₂, entre otros (Luna et al., 2007).

2.9.2 Activación química

Este procedimiento consiste en mezclar el precursor con un compuesto químico que actúe como agente activante para deshidratar el material y reaccionar con los componentes volátiles en la estructura del carbón; como agentes activantes industrialmente se han utilizado el cloruro de zinc, ácido fosfórico, ácido bórico, entre otros (Luna et al., 2007). Para esta activación, se debe establecer una óptima relación de impregnación entre el agente activante y la muestra a reaccionar, una temperatura de activación y un tiempo de residencia, ya que de estos parámetros depende la caracterización del producto final (León et al., 2021). La activación ocurre mediante agitación constante manteniendo un intervalo de temperatura que permita la reacción y genere un tipo de pasta carbonizada que debe ser secada en un horno a temperaturas entre 400-600 °C, dando lugar a la deshidratación final del carbón activado y a la generación de su estructura porosa (U Sevilla, 2011). No obstante, el carbón activado resultante de este tratamiento debe ser sometido a un lavado para extraer y recuperar el agente activante utilizado con anterioridad en el carbón y de esta forma, permitir su acondicionamiento final.

2.10 Reúso del carbón activado

El carbón activado después de ser utilizado se puede reutilizar en nuevos procesos para remoción de surfactantes en aguas de producción. León et al. (2023) estudiaron en la fase final de su investigación, como al reutilizar carbones activados impregnados con nanomateriales y si se afectaba la capacidad de remoción de estos carbones; en su estudio, estos carbones activados después de ser reutilizados tenían una eficiencia de remoción entre 70% y 97% lo cual es un porcentaje representativo. Si se toman en cuenta los costos y lo práctico del reúso de estos

materiales, su aplicación se presenta como una opción atractiva como materiales adsorbentes para tratamiento de aguas de producción.

2.11 Pirólisis

El pirólisis se define como el proceso de degradación térmica de la biomasa que ocurre en ausencia de un agente oxidante (Klug, 2012). En este sentido, el pirólisis del carbón activado surge a partir de la descomposición de la biomasa como la cáscara de cacao o de café con mecanismos y velocidades de reacción variantes a altas temperaturas. Este proceso consta de tres etapas: dosificación y alimentación de la biomasa, transformación de la masa orgánica y, finalmente, la obtención y separación de los productos.

2.12 Análisis de adsorción por método BET

En 1938, Stephen Brunauer, Paul Emmett y Edward Teller crearon la teoría BET. La teoría Langmuir, desarrollada por Irving Langmuir en 1916, fue una adición que complementó a la teoría BET.

La teoría de Langmuir se basa en la relación que ocurre en la adsorción monocapa de moléculas de gas sobre una superficie sólida con la presión de gas de un medio por arriba de la superficie sólida a una temperatura fijada, la cual se observa en la Ecuación (1), donde α es una constante, θ es la cubierta fraccional de la superficie y P es la presión del gas (Raja & Barron, 2022).

$$\theta = \frac{\alpha \cdot P}{1 + (\alpha \cdot P)} \quad (1)$$

En la teoría de Langmuir se supone que el adsorbato (argón, criptón o nitrógeno) posee una energía de adsorción igual en cada uno de los sitios superficiales, los cuales son el área de la muestra donde una molécula puede adsorber. Asimismo, la concentración del adsorbato está relacionada en forma directamente proporcional a su actividad, formando una monocapa y haciendo que solo una partícula puede ocupar cada sitio activo.

Por su parte, en la teoría BET se complementa con la teoría de Langmuir, indicando que puede ocurrir una adsorción física de las moléculas de gas sobre un sólido con un infinito número de capas, pero éstas no interactúan entre sí y a su vez, en cada capa es posible aplicar dicha teoría.

2.12.1 Modelo de Langmuir

Las isothermas de adsorción son modelos matemáticos que describen la distribución del adsorbato entre el líquido y el adsorbente, relacionando la homogeneidad y heterogeneidad de los adsorbentes, el tipo de cobertura y la posibilidad de interacción.

La ausencia de interacción entre las moléculas de adsorbato es el supuesto principal del modelo de Langmuir, que implica que la adsorción se localiza en una monocapa.

2.12.2 Modelo de Freundlich

El modelo de isothermas de Freundlich establece que las energías de adsorción están conectadas en la adsorción de solutos de un líquido sobre la superficie de los adsorbentes. Los modelos de Langmuir y Freundlich se describen de forma matemática mediante las Ecuaciones (2) y (3), respectivamente, en donde Q_e (mg/g) equivale a la concentración en equilibrio del adsorbato en la fase adsorbida, C_e (mg/L) es la concentración en equilibrio del adsorbato en la

fase líquida, Q_{\max} (mg/g) es la capacidad máxima de adsorción correspondiente a la conversión completa de la monocapa, K_L es la constante de Langmuir relacionada con la energía de adsorción y se puede calcular a partir de la pendiente de la gráfica lineal de C_e/Q_e en función de C_e y finalmente, K_F y n son las constantes empíricas, las cuales se pueden calcular a partir de la pendiente y la intersección de la gráfica lineal de $\log C_e$ en función del $\log Q_e$.

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

$$\text{Log } Q_e = \text{Log } K_F + \left(\frac{1}{n}\right) \text{Log } (C_e) \quad (3)$$

2.12.3 Modelo de Temkin

Basha et al. (2008) destacaron que el modelo de Temkin fue creado para tratar de mejorar el entendimiento de los efectos indirectos de la interacción adsorbato-adsorbente. Cuando una ocurre una adsorción isotérmica, la energía de adsorción de las moléculas en la capa decrece linealmente. Según Basha et al. (2008), Ndi Nsami y Ketcha (2013), Salahudeen et al. (2014) y Wahid et al. (2017), la isoterma de adsorción de Temkin se representa mediante la Ecuación (4), en donde K_T es la constante de equilibrio de Temkin, Q_e es la capacidad de adsorción en equilibrio, C_e es la concentración del adsorbato en equilibrio y n_T es la constante de equilibrio de unión a la máxima energía de enlace. Para hallar n_T se calcula la pendiente de la gráfica $Q_e/\text{Ln}C_e$ y K_T se calcula al sacar la exponencial de la intersección del eje de la gráfica lineal $Q_e/\text{Ln}C_e$ sobre la pendiente de la gráfica lineal $Q_e/\text{Ln}C_e$.

$$Q_e = n_T \text{Ln}(K_T) + n_T \text{Ln}(C_e) \quad (4)$$

3. Materiales y métodos

En esta sección se describen los diferentes materiales, equipos y procedimientos experimentales realizados durante la ejecución del presente proyecto de investigación.

3.1 Materiales y equipos

El montaje experimental de este proyecto se desarrolló en el laboratorio del Grupo de Investigaciones en Corrosión de la Universidad Industrial de Santander, en las instalaciones del Parque Tecnológico Guatiguará. Los insumos e instrumentos utilizados se encuentran descritos en la Tabla 6.

Tabla 6.

Materiales, reactivos y equipos utilizados en la investigación.

| Nombre | Especificaciones |
|--------------------------------|--|
| Reactivos: | |
| Biomasa | Cáscara de café (Santander, Colombia) |
| | Cáscara de cacao (Santander, Colombia) |
| Ácido fosfórico | Pureza 95% (H ₃ PO ₄ , Merck KGaA, Alemania) |
| Redicote E-4868 | Pureza 95% (RTE, AkzoNobel©, Países Bajos) |
| Polisorbato 80/Tween 80 | Pureza 99% (T80, Sigma-Aldrich©, EE.UU.) |
| Dodecibencensulfonato de sodio | Pureza 99% (SDBS, Sigma-Aldrich©, EE.UU.) |
| Cloruro de sodio | Pureza 99% (NaCl, Merck KGaA, Alemania) |

Equipos de laboratorio:

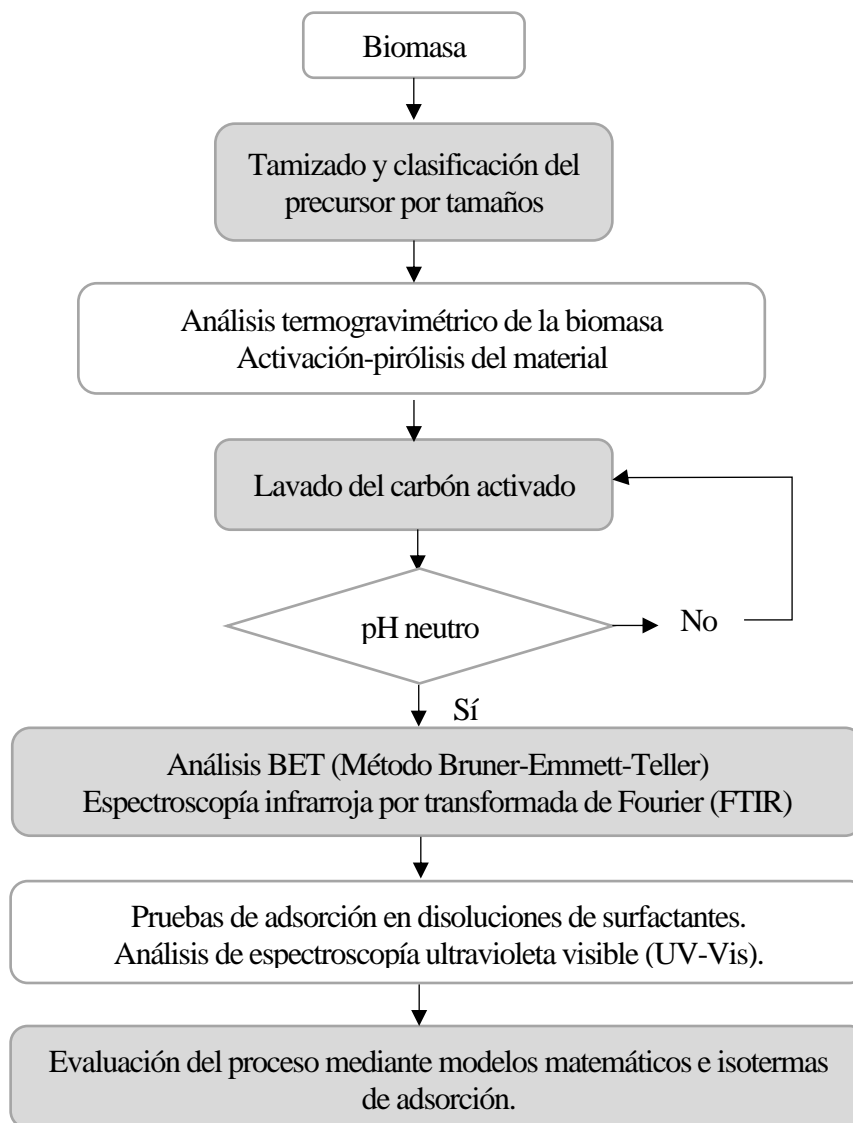
| | |
|------------------------------|--|
| Tamizadora | Gran Test – Pinzuar (PINZUAR©, Colombia) |
| Trituradora | TRAPP TRF 300 (TRAPP©, Brasil) |
| Agitador lineal | MLW Thys 2 (MLW©, Alemania) |
| Horno Carbolite | UN 110 (Carbolite Gero Ltd©, Reino Unido) |
| Espectrofotómetro FTIR | Nicolet Summit X FTIR Thermo Scientific® (Thermo Fisher Scientific©, EE.UU.) |
| Centrifuga | EBA 21 (Andreas Hettich GmbH y Co.KG©, Alemania) |
| Espectrofotómetro UV-Vis | Multiskan™ GO Microplate® (Thermo Fischer Scientific©, España) |
| Estufa | SN30 (Mettler©, Alemania) |
| pHmetro | Hach sensION 3 Benchtop® (Hach©, EE.UU.) |
| Analizador termogravimétrico | TA INSTRUMENTS serie 5500®, software TRIOS® (TA Instruments©, EE.UU.) |

3.2 Metodología experimental

El procedimiento experimental de este proyecto se fundamentó en estudios realizados por Contreras & Garnica (2021) y Rincón (2020), donde se evaluaron carbones activados sintéticos como potenciales materiales adsorbentes. En la Figura 1 se evidencia el procedimiento que se realizó en el curso de esta investigación.

Figura 1.

Metodología experimental del proyecto.



3.2.1 Preparación y selección de la biomasa

En este proyecto se empleó biomasas residuales de cáscara de cacao y cáscara de café, provenientes de la región de Santander, como principales precursores para la síntesis de los carbones activados a evaluar. Inicialmente, la biomasa proporcionada se encontraba triturada, por

lo que se dispuso de una tamizadora para obtener una clasificación del precursor partiendo del diámetro de partícula y así, poder determinar un porcentaje en masa representativo del precursor original para emplear en las pruebas. Este último se evaluó mediante un análisis termogravimétrico (TGA) para establecer los parámetros a considerar en la activación del material.

De esta manera, para la adecuación de la biomasa, se utilizó una tamizadora Gran Test-Pinzuar mostrada en la Figura 2, por medio del cual se logró separar la biomasa por diámetro de partícula empleando tamices de 10, 16, 30, 40, 50, 60, 100 y superior a 100 mesh.

Figura 2.

Tamizadora Gran Test-Pinzuar.



3.2.2 *Análisis termogravimétrico*

Este análisis se realizó con el objeto de evaluar las condiciones de reacciones como descomposición y desvolatilización de los materiales al ser sujetos a una energía de activación causada por la inducción de calefacción a una temperatura constante controlada o en función del cambio de ésta (Cutíño et al., 2011). Por tal razón, es posible determinar la pérdida de masa bajo condiciones controladas de velocidad de calentamiento y, por ende, determinar el rango de temperatura en el cual tiene lugar la mayor reactividad de la biomasa en el proceso de pirólisis (Rincón, 2020).

Para esta prueba se analizaron 10 mg de biomasa procedente de cáscara de cacao y de café en un crisol de Platino HT, el cual se colocó en el equipo TA INSTRUMENTS serie 5500® y con ayuda del software TRIOS® (TA Instruments®, EE.UU.) se midió la pérdida en peso en un intervalo de temperatura entre 30 a 950 °C con una rampa de temperatura de 10°C/min y bajo atmósfera de nitrógeno (N₂). Los resultados de este análisis se describen en la Sección 4.2 donde se realiza la respectiva caracterización de la biomasa vegetal empleada.

3.2.3 *Activación del carbón*

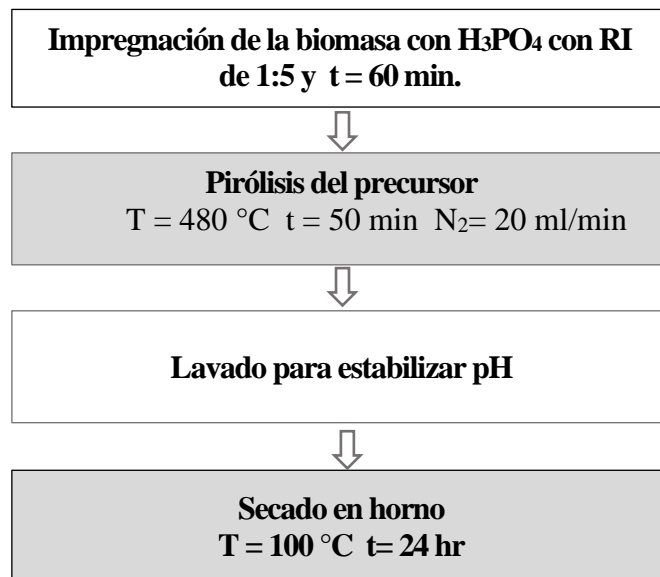
Para la activación del carbón se tuvo en consideración la metodología planteada por León et al. (2021), la cual se encuentra descrita esquemáticamente en la Figura 3, en la cual se obtienen los carbones sintetizados por medio de activación química.

Este procedimiento se realizó considerando una relación de impregnación (RI) de 1:5 (volumen de H₃PO₄/volumen de agua), un tiempo de reacción de 60 minutos y una temperatura aproximada de 100 °C. Después de obtenerse el carbonizado, se calentó en un horno Carbolite por 3 horas a 170 °C para secar la biomasa impregnada.

Posteriormente, las muestras se sometieron a una corrida de pirólisis a una temperatura controlada del reactor de 480 °C por 50 minutos de reacción, permitiendo la activación del carbón. Finalmente, se le realizó un lavado al material adsorbente para recuperar el agente activante (H_3PO_4) y normalizar el pH de la muestra. Este procedimiento se realizó con un separador al vacío y agua destilada neutra, permitiendo la filtración del líquido y el lavado de los sólidos (carbones activados). Es importante resaltar que el procedimiento descrito anteriormente se realizó para cada síntesis de carbón activado, sea a base de cacao y/o de café.

Figura 3.

Método de activación del carbón.



3.2.4 Caracterización por espectroscopia FTIR

Los carbones activados obtenidos se caracterizaron mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) con el objeto de identificar los grupos funcionales representativos asociados a su estructura molecular, ya que permite identificar la huella

molecular específica de la estructura representativa de una sustancia o material a partir de la incidencia o absorbancia del infrarrojo (IR).

Los espectros analizados fueron obtenidos a partir de un equipo Nicolet Summit X FTIR Thermo Scientific® (Thermo Fisher Scientific®, EE.UU.) con el accesorio de muestra para ATR y utilizando el software Thermo Scientific™ OMNIC™ Series® (Thermo Fisher Scientific®, EE.UU.). Las muestras se encontraban a temperatura ambiente (25 °C) y se aplicó una radiación infrarroja en el rango espectral entre los 400 y 4.000 cm^{-1} y 32 scans, con el fin de identificar y hacer seguimiento de la presencia de los grupos funcionales característicos en cada uno de los compuestos analizados (Rincón, 2020). Este análisis se realizó tanto para los carbones activados obtenidos como para los surfactantes empleados. Estos resultados se describen en la Sección 4.3.2 y en la Sección 4.4, respectivamente.

3.2.5 Determinación del área superficial por análisis BET

Las muestras se sometieron un análisis BET para determinar el área superficial y el volumen de poro estimado en los carbones sintetizados. Las muestras se pesaron en celdas de 9 mm de diámetro fabricadas en vidrio borosilicato Micromeritics®. Se desgasificaron a 200 °C y 6 Pa por 8 horas usando aproximadamente una masa de 0,1000 g en un equipo Vac Prep 061 Micromeritics®.

La captura de las isotermas de adsorción de nitrógeno se realizó a 77 K (-196 °C) en un equipo 3FLEXTM de Micromeritics®, en un intervalo de presión relativa (P/P_0) entre 0,0025 y 0,9999. El análisis de los datos fue realizado con el programa 3FLEX V.4.03®, provisto por el Centro de Investigaciones en Catálisis de la Universidad Industrial de Santander. Los resultados obtenidos se registran en la Sección 4.3.1.

3.2.6 Preparación de las disoluciones

Esta investigación evaluó el desempeño adsorbente de los carbones activados sintetizados para retener agentes tensioactivos, por lo que se variaron algunas condiciones en las disoluciones (adsorbatos) a emplear, tales como la naturaleza del surfactante y presencia de sal en el medio. Por consiguiente, se emplearon los surfactantes SDBS (surfactante aniónico), Redicote E-4868 (surfactante catiónico) y T80 (surfactante no iónico), evaluando cada uno a diferentes concentraciones en miligramos por litro (mg/L) en ausencia o presencia de sal (NaCl) a una concentración de 10.000 mg/L, teniendo en cuenta datos de literatura sobre concentraciones de sal comunes presentes en aguas de producción a escala de campo.

Para la preparación de las disoluciones de surfactantes se seleccionó un amplio intervalo de concentraciones que permitieran cotejar el respectivo comportamiento de las muestras a altas y bajas concentraciones, los cuales se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7.

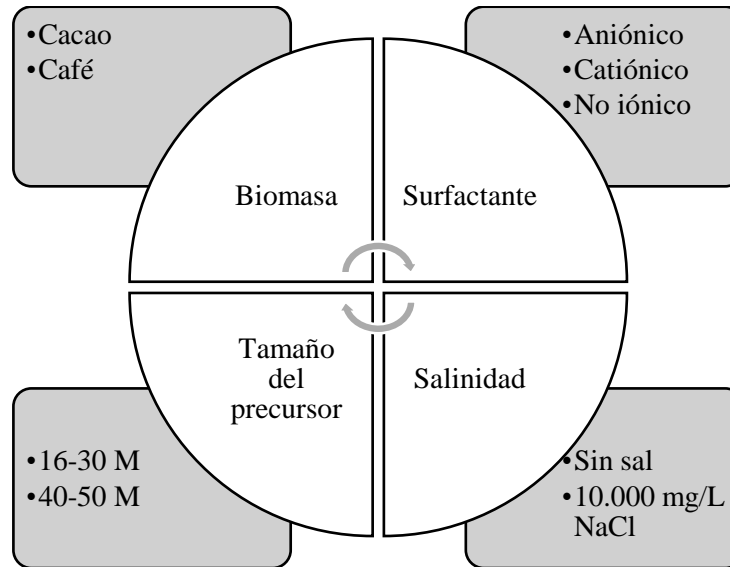
Concentraciones de surfactantes a evaluar.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|
| C [mg/L] | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | 70 | 90 | 100 | 200 | 400 | 600 | 800 | 1.000 | 1.500 |
|-----------------|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|

Basado en lo anterior, las disoluciones preparadas fueron el modelo de agua de producción o agua residual que se evaluaron bajo un enfoque determinante sobre la influencia ejercida en los surfactantes y la presencia o ausencia de salinidad del medio al generar interacción con los carbones activados sintetizados inicialmente. El arreglo de las pruebas a realizar se determinó a partir de las variables planteadas a evaluar en la Figura 4.

Figura 4.

Variables en el montaje.



3.2.7 *Proceso de adsorción por análisis espectroscópico UV-Vis*

La interacción carbón activado-disolución tuvo lugar entre 0,1 g del carbón activado y 15 mL de disolución de una concentración definida de surfactante/salmuera mediante agitación mecánica durante 24 horas alcanzando la condición de equilibrio, haciendo uso de un agitador lineal MLW Thys 2 (MLW©, Alemania). Pasado este periodo de contacto, se procedió a centrifugar la muestra en un equipo Hettich Zentrifugen EBA 21 (Andreas Hettich GmbH y Co.KG©, Alemania) a 6.000 rpm por 20 minutos para separar el sólido de la disolución, en donde sobrenadante se analizó para determinar el porcentaje de surfactante removido por el carbón activado usado (Rincón, 2020).

El método analítico se planteó a partir de los resultados obtenidos mediante espectroscopía ultravioleta-visible (UV-Vis), cuyos espectros fueron tomados con el equipo

Multiskan™ GO Microplate® (Thermo Fischer Scientific©, España). Este análisis se fundamenta en la relación directa entre la absorbancia leída por el instrumento y la concentración de la muestra que se evalúa. De esta manera, inicialmente se realizaron las curvas de calibración con las disoluciones preparadas a diferente concentración de cada tipo de surfactante, con el fin de determinar experimentalmente la asociación de la concentración inicial y, a partir de ésta, poder evaluar la concentración final obtenida luego de la interacción en el proceso de adsorción surfactante-CA y así, poder establecer la eficiencia de retención de tensioactivos de los carbones sintetizados. La eficiencia de adsorción se determinó en función de la ley de Lambert-Beer, la cual establece una relación entre la absorbancia y la concentración, que se muestra en la Ecuación (5), en donde q_e (mg/g) es la capacidad de adsorción, C_o (mg/L) es la concentración inicial de la disolución, C_f (mg/L) es la concentración final de la disolución, W (g) es la masa de carbón activado y V (L) es el volumen de la disolución.

$$q_e = \left(\frac{C_o - C_f}{W} \right) * V \quad (5)$$

A partir de los resultados obtenidos, se determinó el porcentaje de remoción (%RE) de los tensioactivos en función de las concentraciones leídas en el espectro UV-VIS a partir de la Ecuación (6). Esta metodología se realizó teniendo en cuenta las variaciones planteadas anteriormente y se contrastaron los resultados obtenidos para cada carbón activado sintetizado en comparación con un carbón activado comercial.

$$\%RE = \left(\frac{C_o - C_e}{C_o} \right) * 100\% \quad (6)$$

4. Análisis de Resultados

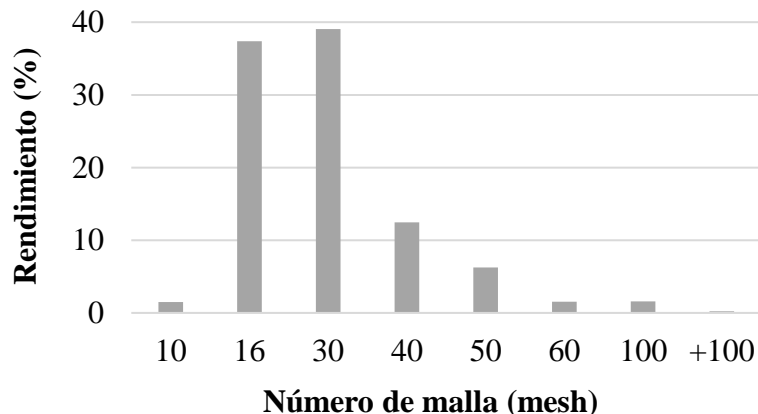
Los resultados obtenidos se describen en este capítulo, donde inicialmente se realiza la caracterización de los precursores partiendo de la biomasa vegetal utilizada en la sección 4 y 4.2 respectivamente; seguido, se describe la caracterización de los CA obtenidos de los precursores en la sección 4.3; en la sección 4.4 se realiza la caracterización de los surfactantes utilizados por espectroscopía FTIR; en la siguiente sección, 4.5, se presentan las curvas de calibración obtenidas por espectroscopía UV-VIS para los surfactantes descritos en la sección anterior; finalmente, en la sección 4.6 se dan a conocer los resultados obtenidos por el análisis de adsorción realizado, dando a conocer las principales eficiencias obtenidas para cada escenario estudiado.

4.1 Rendimiento granulométrico de la biomasa vegetal

Inicialmente, para la extracción del precursor de carbón activado proveniente de cáscara de cacao se contó con una masa aproximada de 1.770 g de biomasa inicial, la cual en su totalidad se sometió a tamizaje por 1 hora. Seguido a esto, se clasificó la biomasa teniendo en cuenta los números de malla mencionados anteriormente, obteniendo un rendimiento en peso significativo entre 16-50 mesh, como se refleja en la Figura 5.

Figura 5.

Rendimiento granulométrico de la cáscara de cacao.

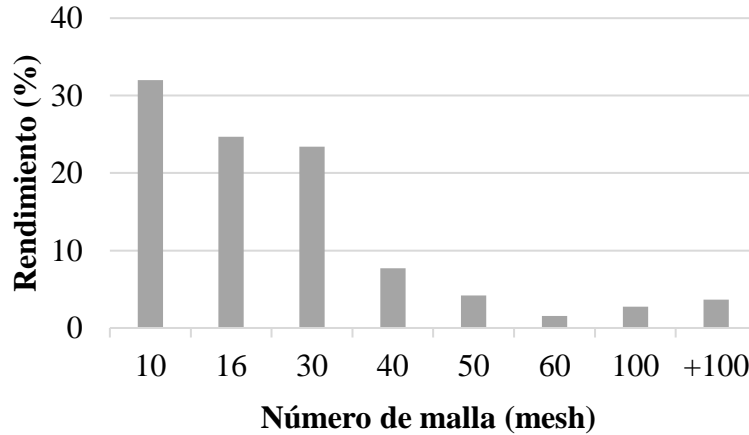


Así pues, se seleccionaron dos intervalos de tamaño de partícula con el objeto de evaluar si el tamaño del precursor original tenía algún efecto representativo en el desempeño del carbón activado a obtener; donde el primer grupo fue de 16-30 mesh y el segundo de 40-50 mesh. Es decir, el tamaño de partícula por grupo se manejó con una relación 1:1, de modo que para un total de 120 g de precursor de 16-30 mesh, se seleccionaron 60 g de 16 mesh y 60 g de 30 mesh. Lo mencionado anteriormente se desarrolló de igual forma para el grupo de 40-50 mesh.

Por otro lado, el análisis expuesto para la biomasa a partir de cáscara de café fue similar, donde se tuvo aproximadamente 1.640 g de biomasa, los cuales fueron sometidos a tamizaje en los mismos números de malla mencionados, obteniendo así una distribución del rendimiento granulométrico en peso como se muestra en la Figura 6.

Figura 6.

Rendimiento granulométrico de la cáscara de café.



En este caso, a pesar de que en la malla de 10 mesh se reflejó un alto rendimiento en peso, se decidió analizar los mismos intervalos establecidos para la cáscara de cacao, con el propósito de evaluar resultados a condiciones similares entre ambos carbones a sintetizar. Así pues, se seleccionaron dos grupos de 120 g de biomasa de cacao y 120 g de biomasa de café para realizar la respectiva síntesis de carbones activados.

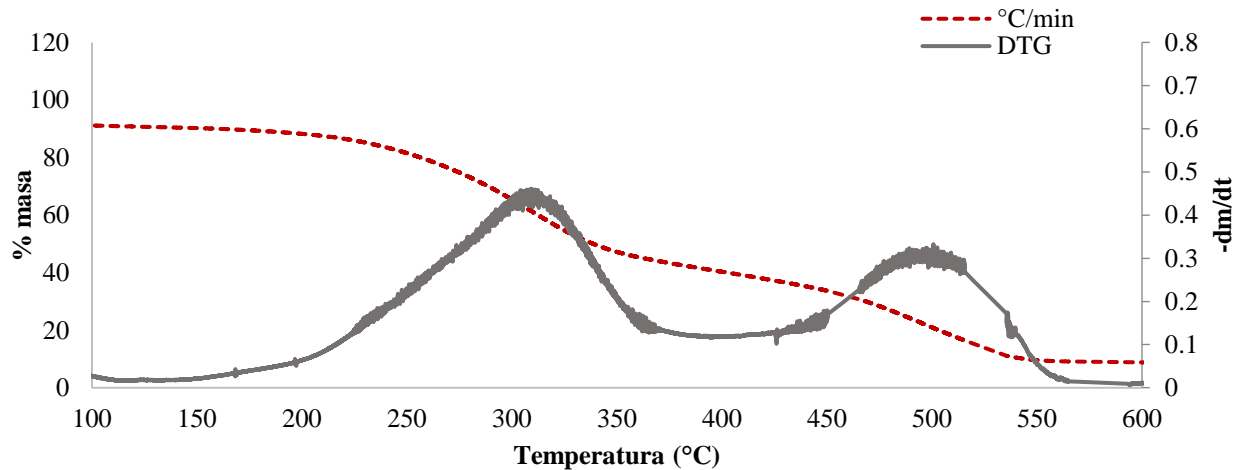
4.2 Caracterización de la biomasa vegetal

Para la caracterización de la biomasa vegetal se realizó un análisis termogravimétrico, el cual permitió establecer los rangos de temperatura en que se presentaba la mayor degradación del material, reflejado como pérdida de masa, con un flujo medido de 10°C/min desde 30°C hasta 950°C en atmósfera inerte de nitrógeno (N₂).

En la Figura 7 se exponen los resultados obtenidos en el análisis correspondiente a la biomasa de café.

Figura 7.

Termograma de la cáscara de café.



De acuerdo con el análisis termogravimétrico, se identificaron dos intervalos para los cuales se observaron picos máximos de degradación másica. En el intervalo de 100-200 °C se determinó un leve incremento aludido a la eliminación de los componentes más livianos presentes en la estructura de la biomasa, representando extractables como terpenos, taninos, ácidos grasos, aceites, humedad y materia mineral (Cutiño et al., 2011).

La mayor pérdida de masa en la descomposición de la cáscara de café se encontró en un rango entre 200-350 °C, donde a 300 °C con una pérdida de masa acumulada aproximadamente del 30% se experimenta la máxima descomposición de la biomasa; en este intervalo se comienza el proceso de pirólisis donde se libera toda la materia volátil presente y predomina la eliminación de la hemicelulosa y la celulosa contenida en la biomasa (Becerra, 2014). En el intervalo de 450°C a 550 °C se reflejó un segundo pico aproximadamente en 500 °C, donde se estableció la liberación de los componentes más pesados como la lignina (León et al., 2021).

Estos resultados fueron similares a los encontrados por Cutiño et al. (2011), donde estos intervalos obtenidos se confieren a las temperaturas de descomposición de los materiales lignocelulósicos presentes en la biomasa, los cuales se muestran en la Tabla 8. De esta manera, se pudo inferir que temperaturas superiores a los 450 °C pueden garantizar la degradación térmica de ambos tipos de biomasa analizados, estableciendo así la temperatura óptima de carbonización para el procedimiento de pirólisis de los carbones activados y, a su vez, dar garantía de la máxima eliminación de componentes volátiles y la mínima formación de cenizas durante su síntesis. A su vez, de este análisis se puede determinar el porcentaje de ceniza residual en el material, el cual es para este caso de 8.8%, siendo esto parte del residuo final con el carbono fijo obtenido.

En la Figura 8 se exponen los resultados obtenidos en el análisis correspondiente a la biomasa de cacao. Con base a los resultados obtenidos por el análisis termogravimétrico de la cáscara de cacao, se estableció que la mayor pérdida de masa se obtuvo aproximadamente a los 300°C, donde es posible evidenciar el pirólisis de la biomasa con la pérdida de la mayoría de sus componentes lignocelulósicos por encima de los 350°C, acorde a los resultados obtenidos en laboratorio por Rincón (2020).

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente en esta sección, para temperaturas mayores a los 350°C se infiere que se obtienen resultados prometedores de sólidos con porcentaje de lignina potencialmente creadores de materiales carbonosos para la activación química del carbón activado. Sin embargo, se evidencia un alto porcentaje de ceniza, con alrededor de un 40% que refleja residuo de componentes minerales o compuestos inorgánicos que no se pudieron descomponer en el pirólisis inicial.

Figura 8.

Termograma de la cáscara de cacao.

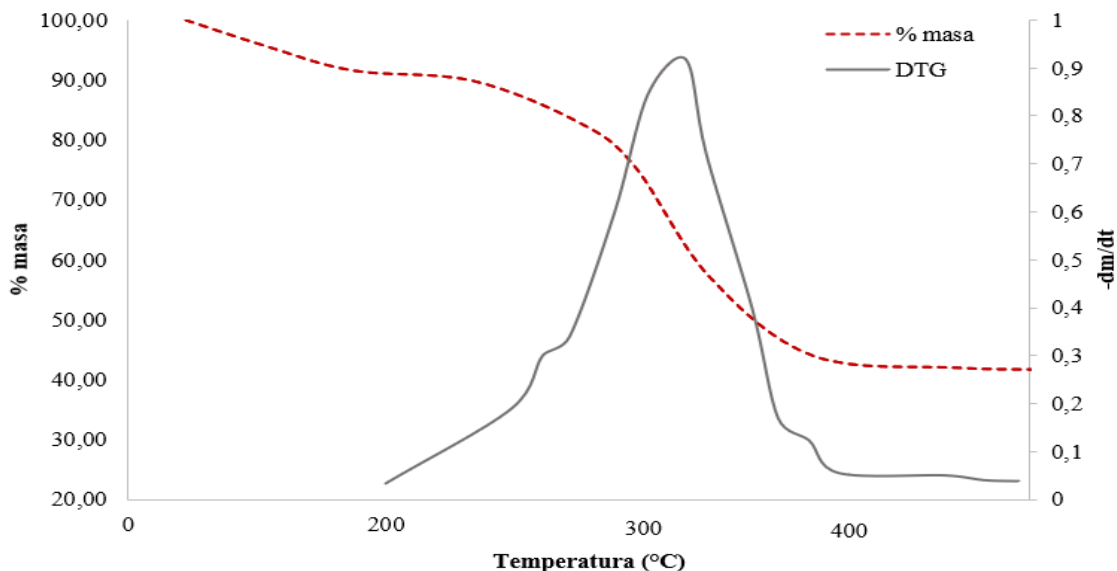


Tabla 8.

Descomposición de los materiales lignocelulósicos de la biomasa vegetal.

| Temperatura (°C) | Razón |
|------------------|---------------------------------------|
| 100 - 250 | Descomposición de los extractables |
| 250 - 350 | Descomposición de hemicelulosa |
| 350 - 500 | Descomposición de la celulosa/lignina |
| > 500 | Descomposición de la lignina |

Nota. Esta tabla fue adaptada de “Análisis termogravimétrico y térmico diferencial de diferentes biomásas vegetales” (p. 38), por Cutiño et al (2011), Tecnología Química, vol. XXXI

De esta manera, se pudo inferir que temperaturas superiores a los 450 °C pueden garantizar la degradación térmica de ambos tipos de biomasa analizados, estableciendo así la temperatura óptima de carbonización para el procedimiento de pirólisis de los carbones activados y, a su vez, dar garantía de la máxima eliminación de componentes volátiles y la mínima formación de cenizas durante su síntesis.

4.2.1 Rendimiento del proceso de pirólisis

Durante la preparación del carbón activado se utilizó un pirolizador para la activación del carbón; el proceso de pirólisis se realizó con 10 balines en el reactor por cada corrida realizada a condiciones uniformes para cada síntesis realizada. En la Tabla 9 se muestran los rendimientos obtenidos, considerando la pérdida de masa al término del proceso de pirólisis de los carbones activados. Se concluyó que el rendimiento en masa con los precursores sintetizados es muy similar, lo que garantiza un procedimiento metodológico óptimo y uniforme.

Autores como Luperón et al. (2020) estudiaron cómo era el rendimiento de biocarbones, bioaceites y biogás al realizar un pirólisis lento de cascarillas de café y cacao para su posible uso como fuentes de energía y fertilizante, encontrando que al sintetizar biocarbones, la cáscara de cacao poseía un rendimiento de 31,1% y la cáscara de café un 30,8%; es decir, ambos carbones sintetizados, provenientes de diferente biomasa (cacao y café) presentan rendimientos similares al momento de someterlos al proceso de pirólisis para su síntesis a igualdad de condiciones.

Tabla 9.

Rendimiento de pirólisis.

| Muestra | Masa inicial (g) | Masa final (g) | Rendimiento (%) |
|-----------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|
| CA. Cacao 16-30 | 424 | 178 | 42 |
| CA. Cacao 40-50 | 387 | 172 | 45 |
| CA. Café 16-30 | 493 | 280 | 57 |
| CA. Café 40-50 | 463 | 220 | 47 |

4.3 Caracterización de los carbones activados

En esta caracterización se describen los resultados obtenidos por análisis de superficie y distribución de tamaño de poro de los CA y el análisis por espectroscopía FTIR (sección 4.3.1 y 4.3.2 respectivamente); análisis con los cuales se permitió definir las principales propiedades de estos materiales.

4.3.1 Análisis de superficie específica y determinación de la distribución y tamaño de poro

A partir del método BET se logró determinar el área superficial específica de los carbones activados sintetizados. Los datos plasmados en la Tabla 10 representan los resultados del análisis de las muestras de carbones activados sintetizados previamente a partir de cáscara de cacao y cáscara de café y su comparación con un carbón activado distribuido comercialmente.

Tabla 10.

Caracterización BET de los carbones activados sintetizados

| Muestra | Volumen total (cm ³ /g) | A _{BET} (m ² /g) | Tamaño de poro (nm) |
|-----------------|---------------------------------------|---|------------------------|
| CA. Cacao 16-30 | 0,8098 | 1.203 | 3.86 |
| CA. Cacao 40-50 | 0,6888 | 971 | 3.96 |
| CA. Café 16-30 | 0,9724 | 1.264 | 4.28 |
| CA. Café 40-50 | 0,4995 | 695 | 4.04 |
| CA. Comercial | 0,4402 | 533 | 6.32 |

Nota. La abreviación CA hace referencia a carbón activado.

La constante C representa la interacción entre el adsorbato y el adsorbente; esta interacción debe ser lo menor posible para garantizar que se cumpla el principio del método BET y se expresa por medio de la Ecuación (7), en donde E_1 es el calor de adsorción para la primera capa de adsorbato, E_L es el calor para la segunda y las capas superiores del adsorbato y es igual al calor de licuefacción o calor de vaporización, R es la constante universal de los gases y T es la temperatura a la cual se hace el análisis.

$$C = \exp\left(\frac{E_1 - E_L}{RT}\right) \quad (7)$$

Con los resultados obtenidos es posible identificar que los carbones activados sintetizados presentan una destacada área superficial en contraste con el carbón comercial evaluado, es decir, es posible analizar que los CA sintetizados de menor tamaño de poro presentan una mayor área

superficial en contraste con el CA comercial, sobresaliendo el CA Café 16-30 con un área superficial de 1.264 (m²/g). De esta manera, la eficiencia del proceso en la creación de CA con alta área superficial se presenta de mayor a menor orden así: CA-Café 16-30 > CA-Cacao 16-30 > CA-Cacao 40-50 > CA-Café 40-50 > CA-Comercial.

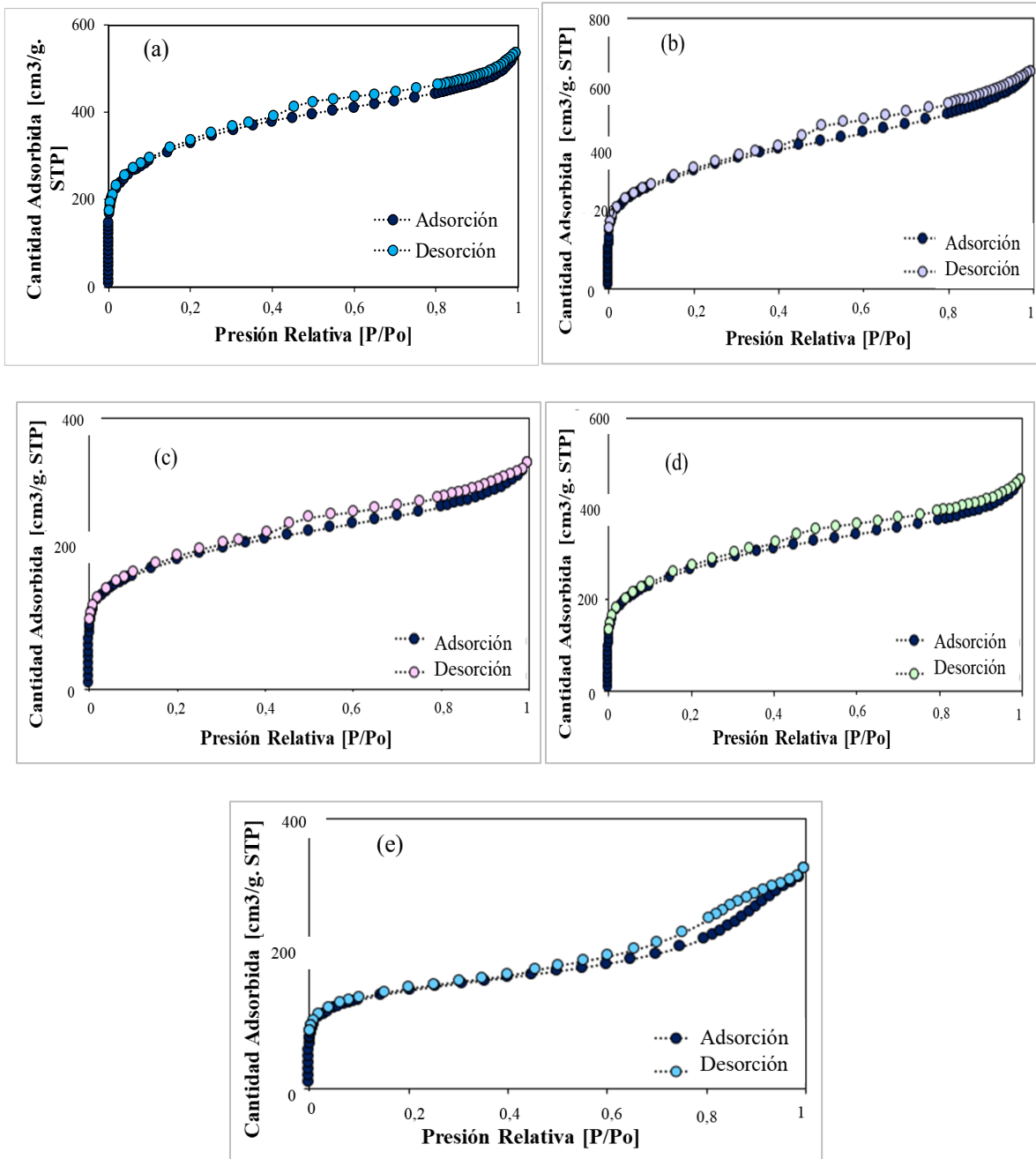
Estos resultados atribuyen el incremento en el volumen poroso y el área de los CA al proceso de impregnación realizado en su síntesis; no obstante, en este escenario no se puede considerar inversamente proporcional el tamaño de poro obtenido con el área superficial resultante, pues los CA con menor tamaño no reflejan mayor área superficial; esta discordancia se atribuye al deterioro causado por la molienda inicial del precursor y la agitación inducida en el procedimiento de activación.

A partir del análisis de adsorción/desorción de nitrógeno es posible obtener las isothermas mostradas en la Figura 9. Según las isothermas obtenidas, se determina que las curvas de adsorción/desorción manifiestan una tendencia característica de la adsorción multicapa sobre materiales porosos con influencia del proceso de histéresis, típico de materiales mesoporosos cuando se produce la condensación capilar (Raja & Barron, 2022).

Esto se puede comprobar considerando los tamaños de poro obtenidos en el método BET para cada una de las muestras que, según la IUPAC, los tamaños de diámetro entre 2-50 nm es inherente a materiales mesoporosos, tal como se muestra en la Tabla 11. De esta manera, se puede inferir que los carbones activados sintetizados demuestran un tamaño de poro sobresaliente con curvas esquemáticamente prolongadas de adsorción/desorción de N₂ que prometen una superficie adecuada de retención.

Figura 9.

Curvas de adsorción/desorción de N_2 de los carbones activados



Nota. Curvas de adsorción/desorción para: (a) CA-Cacao 16-30, (b) CA-Café 16-30, (c) CA-Café 40-50, (d) CA-Cacao 40-50 y (e) CA-Comercial.

Tabla 11.

Clasificación por tamaño de poro según IUPAC.

| Tipo | Diámetro (nm) |
|-------------|----------------------|
| Microporoso | < 2 |
| Mesoporoso | 2-50 |
| Macroporoso | > 50 |

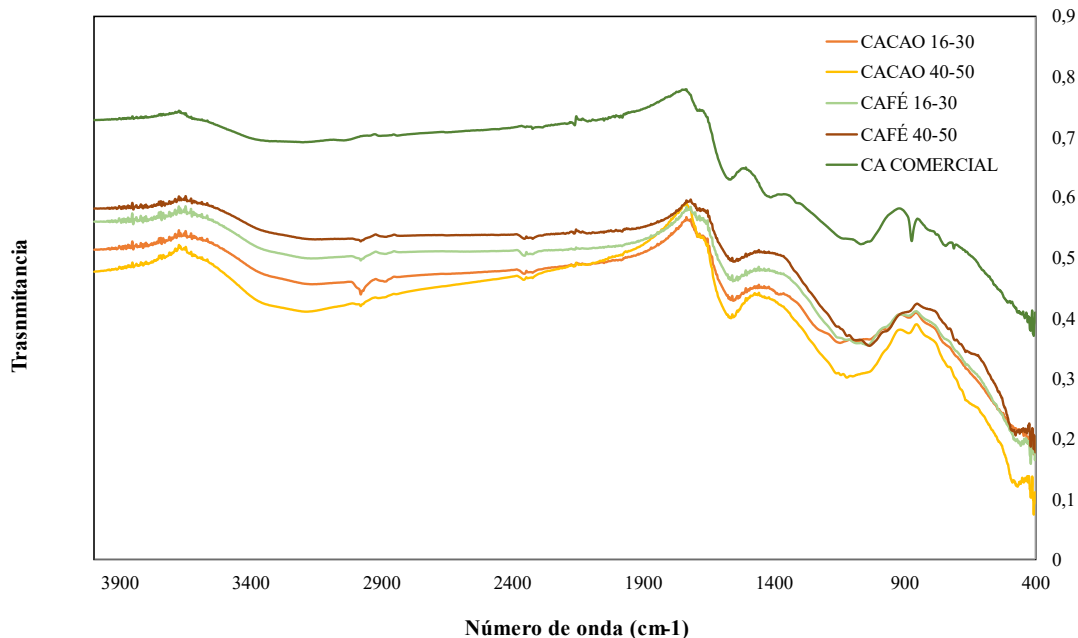
Nota. Esta tabla fue adaptada según la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC).

4.3.2 Caracterización FTIR para el carbón activado

Se realizó la caracterización por espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para evidenciar los grupos funcionales asociados a la estructura de los CA obtenidos con anterioridad. En la Figura 10 se reflejan los resultados obtenidos, en donde se puede evidenciar algunos grupos funcionales presentes en la estructura de los carbones activados considerando los picos de número de onda registrados en la lectura de la banda de adsorción de los materiales. Aunque los resultados difieren en cuanto a la amplitud registrada, el comportamiento coincide para los cinco CA analizados; es decir, las características de los carbones activados sintetizados en laboratorio, tanto de biomasa de cacao y biomasa de café, presentan características similares a un carbón activado comercial (industrial). Por lo anterior, se puede inferir que la metodología de activación empleada para estos materiales fue adecuada, proporcionando en los CA obtenidos los grupos funcionales típicos de un carbón activado de uso comercial.

Figura 10.

Espectros FTIR de los carbones activados.



En la Tabla 12 se especifican los resultados obtenidos de las bandas leídas en el espectro FTIR, esto permite evidenciar que los CA presentan en su mayoría alto contenido de grupos funcionales OH, C=O, C-O-C y C-O, lo que concuerda con resultados obtenidos por otros autores. (Rincón, 2020), en su estudio de la síntesis de carbones activados a partir de cáscara de cacao, obtuvo un espectro con procedencia similar al arrojado en este análisis; por lo anterior, se infiere que a condiciones constantes de síntesis, es posible obtener CA con grupos funcionales persistentes en su estructura que puedan favorecer, según el requerimiento, el plano adsorbente del material

Tabla 12.

Grupos funcionales presentes en los carbones activados.

| Grupo funcional | Número de onda (cm⁻¹) | Sustancia |
|------------------------|---|-----------------------------|
| -OH | 3200 | Agua proveniente de humedad |
| C=C | 1550-1570 | Aromáticos |
| C-O-C, C=O | 1010-1142 | Éteres, Ésteres |

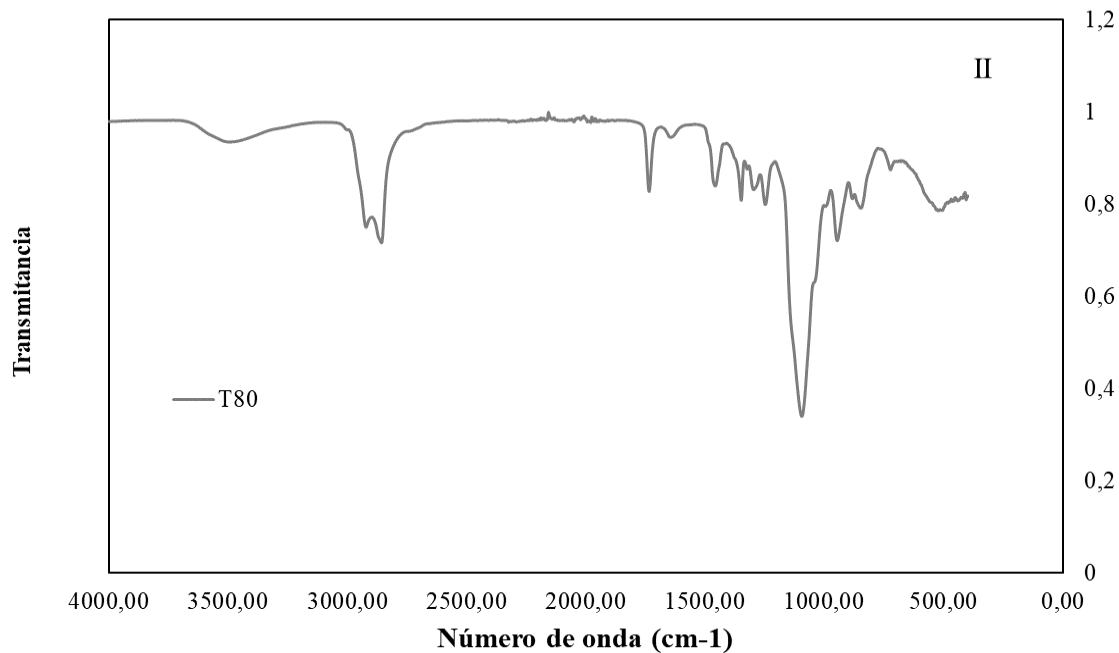
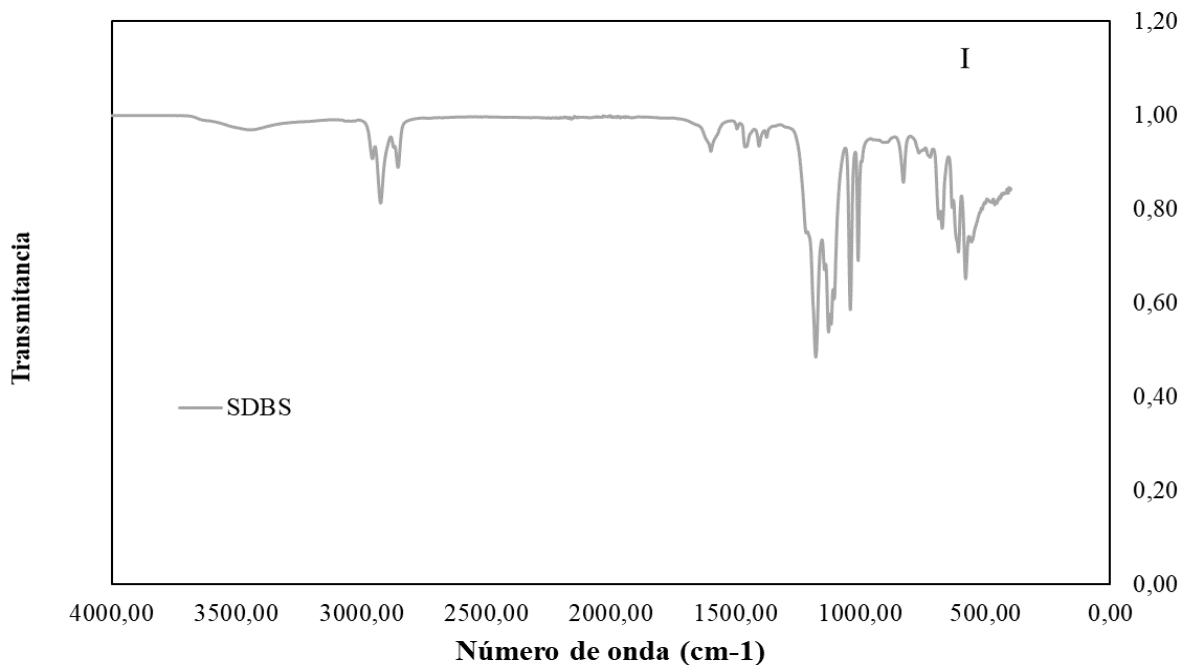
Nota. Esta tabla fue adaptada teniendo en cuenta el estudio de Coates (2000). Interpretation of infrared spectra, A practical approach. Encyclopedia of Analytical Chemistry.

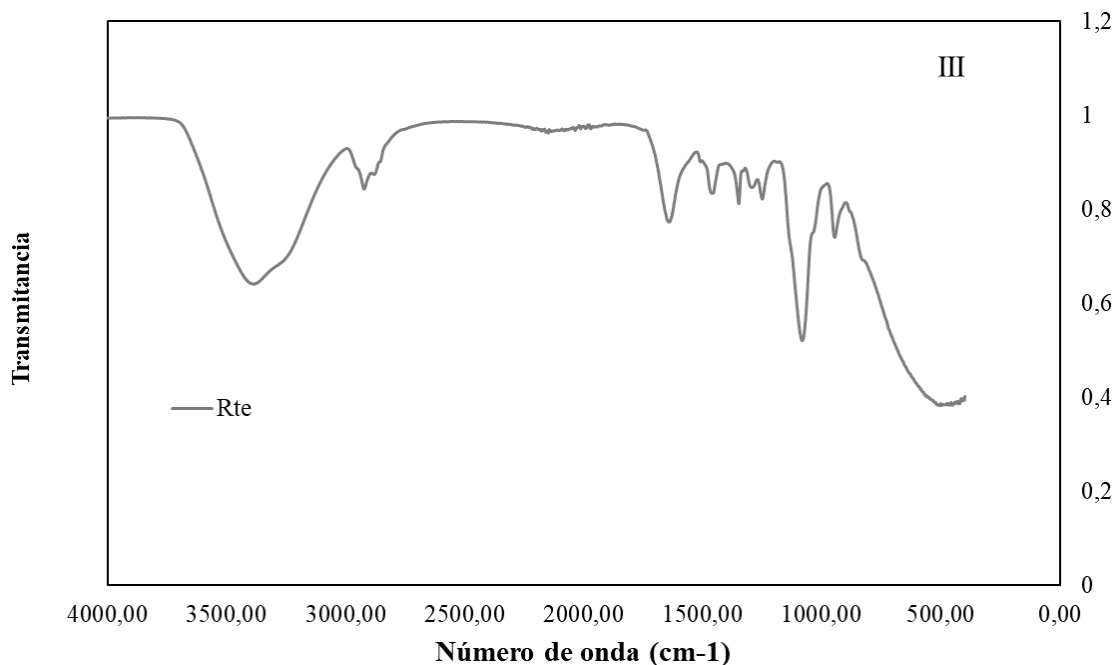
4.4 Caracterización de los surfactantes empleados

En la Figura 11 se sintetizan los resultados obtenidos según espectroscopía FTIR para los surfactantes empleados en el estudio (SDBS, Redicote, Tween-80) representando el índice de transmitancia de cada muestra, leído en una banda específica, los cuales se pueden observar en la Tabla 13.

Figura 11.

Espectros FTIR de los surfactantes empleados.





Nota. La Figura 11 se divide en tres secciones para practicidad visual del espectro obtenido para cada tipo de surfactantes: (I) SDBS, (II) T80 y (III) Rte.

Tabla 13.

Grupos funcionales presentes en los surfactantes empleados.

| | Grupo funcional | Número de onda (cm⁻¹) | Sustancia |
|-------------|-------------------------------------|---|---------------------|
| SDBS | -CH ₂ , -CH ₃ | 2900-3400 | Metilos-metilenos |
| | C=O, -SO ₃ H | 1090-1190 | Ésteres, Sulfonatos |
| | -CO-Cl | 450-590 | Cloruros de ácidos |
| RTE | -NH ₂ | 3621-3061 | Aminas |
| | C=C, C-H | 1699-1510 | Aromáticos |
| | R-X | 600-400 | Haluros de alquilo |

| | | | |
|------------|-----------------------------------|-----------|--|
| | -OH | 3600 | Estiramiento grupo hidroxilo |
| | CH | 2980-2760 | Aldehídos, Alcanos |
| T80 | C=O | 1700 | Éster |
| | -OH | 1600 | Doblamiento OH |
| | CH ₂ , PH ₃ | 850-1180 | Estiramiento CH ₂ , Fosfinas |

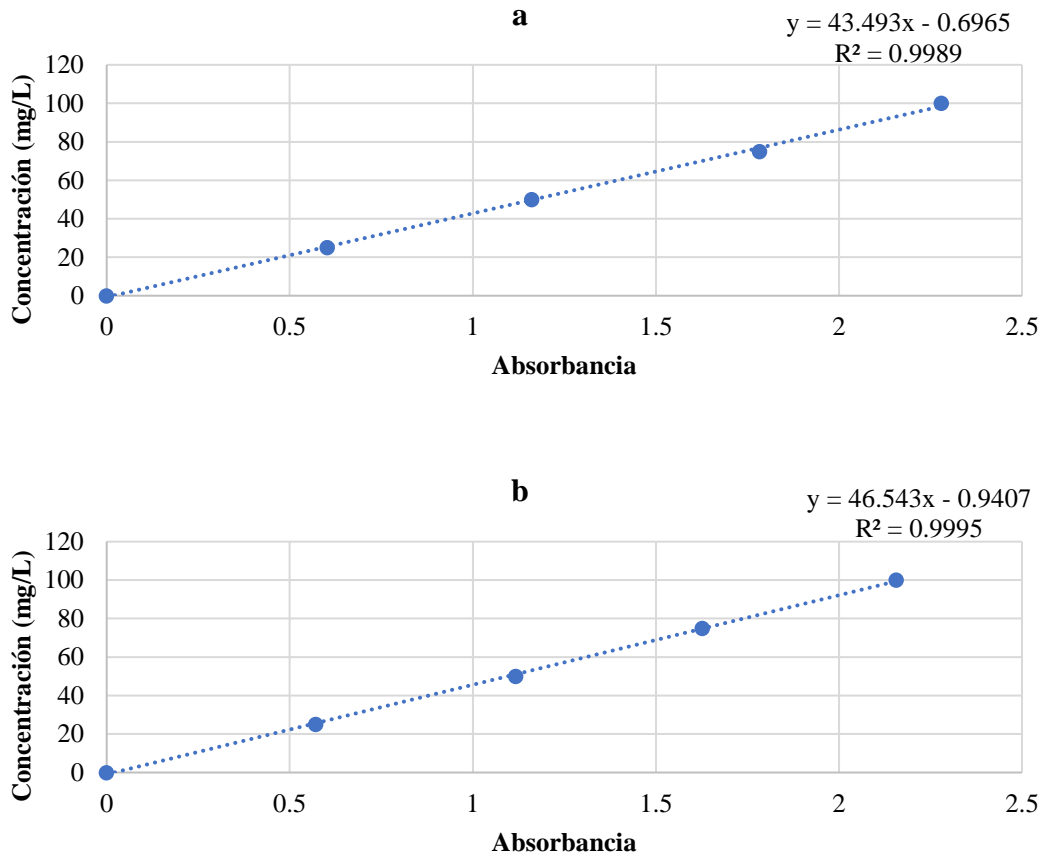
4.5 Construcción de curvas de calibración (UV-VIS)

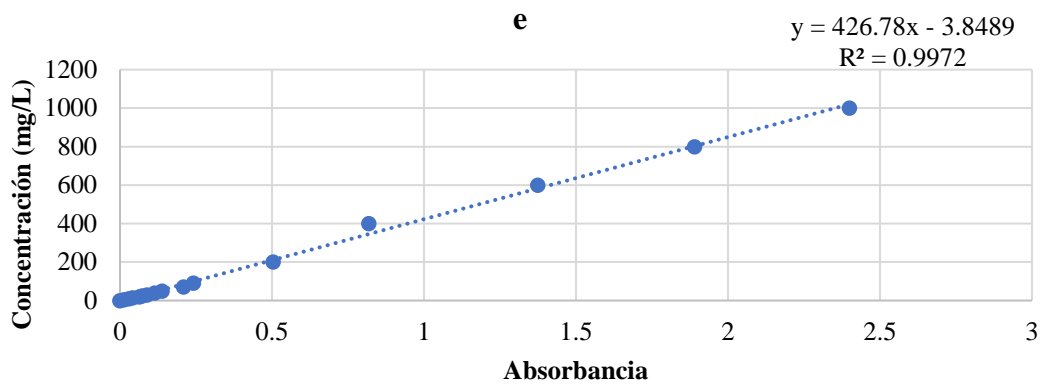
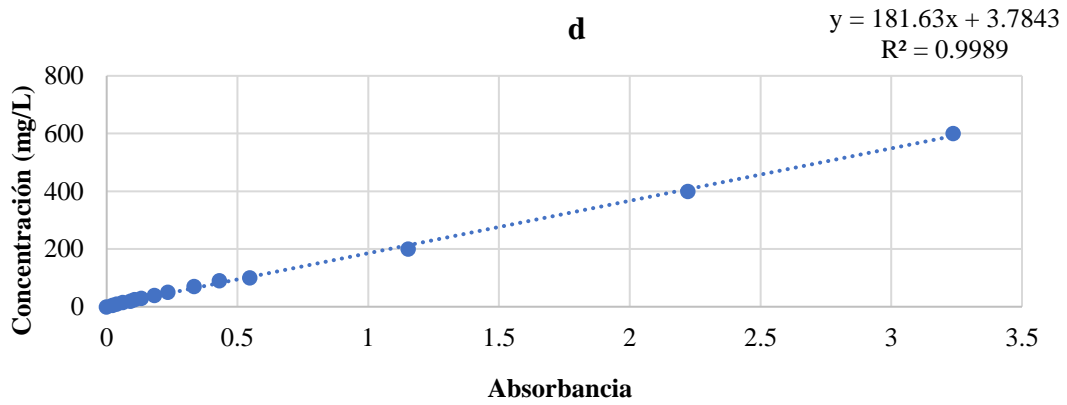
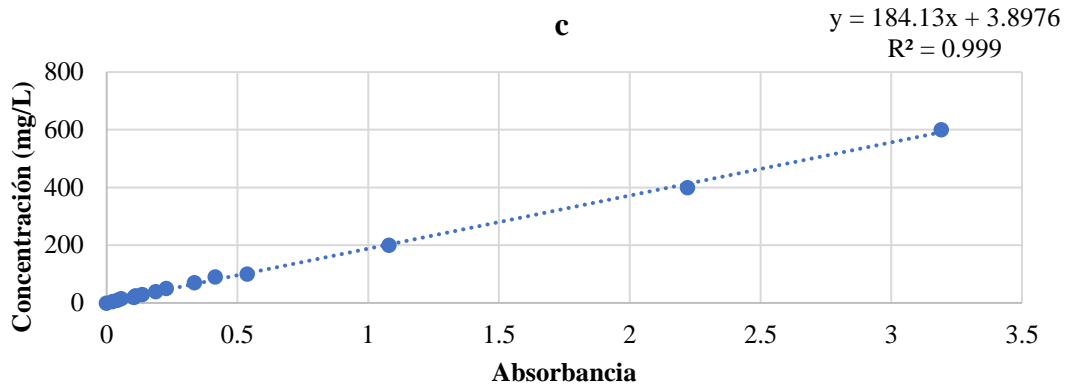
Se utilizaron disoluciones de los tres tipos de surfactantes estudiados en diferentes concentraciones (5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 70, 90, 100, 200, 400, 600, 800, 1000, 1000, 1500) en ppm (mg/L), variando la condición de salinidad, es decir, sin salinidad presente en la disolución a preparar y con salinidad a 10.000 ppm (mg/L) con los mismos puntos mencionados anteriormente. Estas muestras se analizaron a través del espectrofotómetro UV-VIS en un rango de longitud de onda de 200-500 nm para verificar la lectura en el espectro, cuyas gráficas se muestran en el Apéndice A.

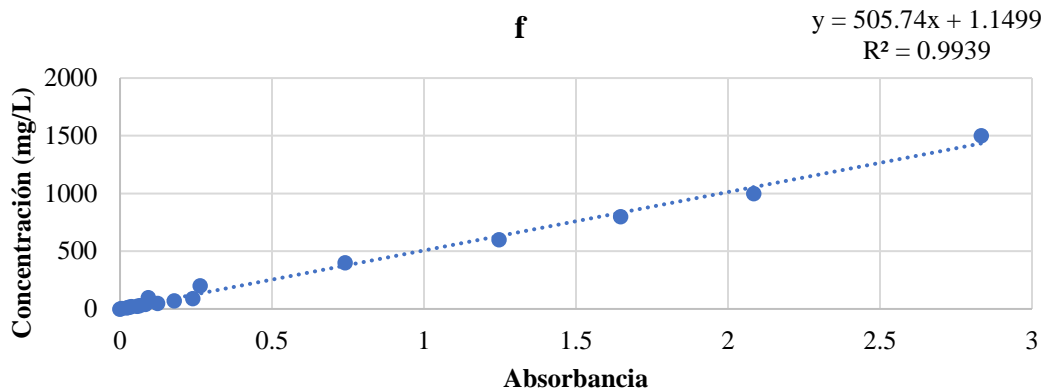
La longitud de onda máxima registrada al efectuar el barrido de varias concentraciones para los tres surfactantes fue de aproximadamente 230 nm (Apéndices A), por consiguiente, se tomó este valor de referencia para los tres casos con el objeto de evaluar el procedimiento a las mismas condiciones. De esta manera, para aplicar la ley de Lambert – Beer es necesario linealizar las curvas obtenidas a la longitud de onda seleccionada (230 nm), por lo cual, se grafica la absorbancia en función de la concentración en este punto, como se muestra en la Figura 12.

Figura 12.

Curvas de calibración de las disoluciones de surfactantes.







Nota. Las curvas de linealización se realizaron para cada surfactante con salinidad (CS) y sin salinidad (SS) y están mostradas así: (a) SDBS SS, (b) SDBS CS, (c) Redicote SS, (d) Redicote CS, (e) Tween-80 SS y (f) Tween 80 CS.

A partir de estas curvas, se obtuvieron modelos matemáticos linealizados con regresiones lineales superiores al 0,99 para cada escenario a evaluar (surfactante con/sin salinidad), con el cual se evaluaron las concentraciones iniciales y finales, seguidas del proceso de adsorción, en contraste con la longitud de onda obtenida por espectroscopía en la disolución inicial sin adición de CA, denominada como “blanco”, cuyo valor de longitud de onda fue establecido a 230 nm para cada tipo de disolución de surfactante.

4.6 Análisis de adsorción

Para el análisis de la adsorción se emplearon los modelos matemáticos descritos en la sección 2.12. Se aplicaron los modelos matemáticos (Langmuir, Freundlich y Temkin) para establecer cuál de estos se ajustaba mejor como modelo de adsorción en el proceso de remoción de surfactantes, debido al uso de carbones activados específicos.

Con cada modelo se determinó la capacidad de adsorción (Q_e), la constante de equilibrio (n), la concentración del surfactante inicial (antes del proceso de adsorción realizado por el carbón activado) (C_i), la concentración del surfactante final (después del proceso de adsorción realizado por el carbón activado) (C_e), la concentración K siendo la constante de equilibrio y con la relación de estos se hicieron las gráficas lineales para encontrar los R^2 . El análisis del modelo de adsorción empleado se describe en el inciso 2.12.3. Los siguientes cálculos realizados son matemáticos, por lo que no se tomó en cuenta la temperatura, la presión, ni el tiempo para obtener los resultados; sin embargo, el procedimiento experimental para los análisis de adsorción con los carbones activados sintetizados se describe en la sección 3.2.7, siendo la Ecuación (6) la empleada para calcular los porcentajes de remoción.

Para los calcular los parámetros de adsorción según el modelo de Temkin, se modificó la fórmula de la Ecuación (5) de la sección 3.2.7, obteniendo la Ecuación (9). Para hallar el Q_e se convirtió su unidad de mg/L a ug/L (microgramos por litro) multiplicando por 1000; por consiguiente los valores de C_e y C_i se volvieron ug/L, para tener los puntos en las isothermas de adsorción mejor visibles y distribuidos.

$$Q_e = C_e - C_i \quad (9)$$

Las concentraciones teóricas para los surfactantes T80 y RTE fueron 100 mg/L, 200 mg/L, 300 mg/L, 400 mg/L, 500 mg/L, 750 mg/L, 1000 mg/L, 1500 mg/L, 2000 mg/L, 2500 mg/L; y para el surfactante SDBS fueron 5 mg/L, 10 mg/L, 20 mg/L, 40 mg/L, 60 mg/L, 80 mg/L, 100 mg/L, 200 mg/L, 300 mg/L, 500 mg/L, 1000 mg/L y 2000 mg/L, sin embargo, las concentraciones iniciales reales de los surfactantes en las pruebas realizadas se encuentran denotadas en las tablas como C_i ($\mu\text{g/L}$). Las concentraciones teóricas escogidas para el SDBS se eligieron diferente a las del T80 y RTE debido a que el SDBS presentaba adsorbancias altas para

la curva de calibración después de 50 mg/L, por lo que se optó por cambiar el rango de concentraciones para tener adsorbancias preferiblemente inferiores a 1 y así se obtuvieran datos mejor ajustados.

Después de obtener C_e , se calcula el logaritmo natural a C_e poder obtener la isotermas de adsorción según Temkin ($Q_e/\ln C_e$) y poder encontrar los R^2 de cada tipo de carbón activado con respecto a los surfactantes estudiados. Para hallar los valores n_T se calcularon las pendientes de $Q_e/\ln C_e$ y para hallar los valores de K_T se efectuó la operación exponencial de la intersección de ($Q_e/\ln C_e$) sobre la pendiente de ($Q_e/\ln C_e$) para cada gráfica de carbón activado.

$$n_T = m (Q_e/\ln C_e) \quad (10)$$

$$K_T = e^{((\text{intercepción } (Q_e/\ln C_e))/(m (Q_e/\ln C_e)))} \quad (11)$$

4.6.1 Adsorción del T80 en carbón activado

Según las anteriores investigaciones que se han efectuado, se pueden utilizar las isotermas de adsorción de Langmuir, Freundlich y Temkin para modelar de forma matemática el comportamiento de la adsorción en los carbones activados.

Para establecer los parámetros de la adsorción del T80 sobre los carbones activados y calcular Q_e , n_T y K_T (*Tabla 14*, *Tabla 15*, *Tabla 16*, *Tabla 17* y *Tabla 18*), se efectuaron la Ecuación (9), Ecuación (10) y Ecuación (11) según el modelo de Temkin.

Tabla 14. *Parámetros de adsorción del T80 sobre el CA Café 16-30M*

| Parámetros de adsorción del T80 sobre el CA Café 16-30 M | | | | | |
|---|-------------------|-------------------|---------------------------|------------------|--------------|
| Concentraciones (mg/L) | Ce (µg/L)* | Ci (µg/L)* | % de adsorción | Qe (µg/L) | Ln Ce |
| 100 | 70666,89 | 92944,8 | 23,97 | - | - |
| 200 | 71947,23 | 217308,5 | 66,89 | - | - |
| 300 | 69343,87 | 311968,3 | 77,77 | - | - |
| 400 | 78092,86 | 371760,18 | 78,99 | - | - |
| 500 | 63155,56 | 512298,83 | 87,67 | 449143,27 | 11,05 |
| 750 | 68618,34 | 747411,93 | 90,82 | 678793,59 | 11,14 |
| 1000 | 78007,50 | 1044877,5 | 92,53 | 966870,09 | 11,26 |
| 1500 | 83043,51 | 1397625,7 | 94,06 | 1314582,1 | 11,33 |
| 2000 | 99645,25 | 1849158,94 | 94,61 | 1749513,6 | 11,51 |
| 2500 | 93115,52 | 2255453,5 | 95,87 | - | - |

Nota: * µg/L significa microgramos por litro.

Para realizar los cálculos de n_T y K_T únicamente se tomaron en cuenta los datos de los puntos donde la gráfica estaba linealizada. El valor de n_T fue de $2,90 \times 10^6$, el valor de K_T fue de $1,84 \times 10^{-5}$, y el valor de R^2 arrojado por la gráfica linealizada ($Q_e/\ln C_e$) fue de 0,9868. El % promedio de adsorción del CA Café 16-30 M fue de 91,94; este promedio se calculó utilizando solamente los valores (concentraciones de 500, 750, 100, 1500, 2000) linealizados de la gráfica $Q_e/\ln C_e$.

Tabla 15. *Parámetros de adsorción del T80 sobre el CA 40-50M*

| Parámetros de adsorción del T80 sobre el CA Café 40-50 M | | | | | |
|---|-------------------|-------------------|-----------------------|------------------|--------------|
| Concentraciones (mg/L) | Ce (µg/L)* | Ci (µg/L)* | % de adsorción | Qe (µg/L) | Ln Ce |
| 100 | 37932,86 | 92944,8 | 59,19 | 55011,94 | 10,54 |
| 200 | 17362,05 | 217308,5 | 92,01 | 199946,43 | 9,76 |
| 300 | 42499,41 | 311968,3 | 86,38 | 269468,89 | 10,66 |
| 400 | 65289,46 | 371760,18 | 82,44 | 306470,72 | 11,09 |
| 500 | 38231,61 | 512298,83 | 92,54 | 474067,22 | 10,55 |
| 750 | 21501,83 | 747411,93 | 97,12 | - | - |
| 1000 | 35969,67 | 1044877,59 | 96,56 | - | - |
| 1500 | 13862,47 | 1397625,7 | 99,01 | - | - |
| 2000 | 6308,46 | 1849158,94 | 99,66 | - | - |
| 2500 | 19709,36 | 2255453,5 | 99,13 | - | - |

Nota: * µg/L significa microgramos por litro.

Para realizar los cálculos de n_T y K_T únicamente se tomaron en cuenta los datos de los puntos donde la gráfica estaba linealizada. El valor de n_T fue de $8,19 \times 10^4$, el valor de K_T fue de $6,53 \times 10^{-4}$, y el valor de R^2 arrojado por la gráfica linealizada ($Q_e/\ln C_e$) fue de 0,0656. El % promedio de adsorción del CA Café 40-50 M fue de 82,51; este promedio se calculó utilizando solamente los valores (concentraciones de 100, 200, 300, 400, 500) linealizados de la gráfica $Q_e/\ln C_e$.

Tabla 16. Parámetros de adsorción del T80 sobre el CA cacao 16-30M

| Parámetros de adsorción del T80 sobre el CA Cacao 16-30 M | | | | | |
|--|-------------------|-------------------|-----------------------|------------------|--------------|
| Concentraciones (mg/L) | Ce (µg/L)* | Ci (µg/L)* | % de adsorción | Qe (µg/L) | Ln Ce |
| 100 | 50352,16 | 92731,41 | 45,7 | - | - |
| 200 | 45700,26 | 190378,68 | 76 | - | - |
| 300 | 1400,49 | 251066,79 | 99,44 | 249666,3 | 7,24 |
| 400 | 4985,45 | 345385,17 | 98,56 | - | - |
| 500 | 7844,87 | 459548,82 | 98,29 | - | - |
| 750 | 3534,39 | 708361,56 | 99,50 | - | - |
| 1000 | 9850,74 | 977147,61 | 98,99 | 967296,87 | 9,2 |
| 1500 | 43438,32 | 1198319,44 | 96,38 | 1154881,12 | 10,68 |
| 2000 | 115990,92 | 1922991,88 | 93,97 | 1807000,96 | 11,66 |
| 2500 | 274923,8 | 2089862,86 | 86,84 | 1814939,06 | 12,52 |

Nota: * µg/L significa microgramos por litro.

Para realizar los cálculos de n_T y K_T únicamente se tomaron en cuenta los datos de los puntos donde la gráfica estaba linealizada. El valor de n_T fue de $3,05 \times 10^5$, el valor de K_T fue de $1,78 \times 10^{-3}$, y el valor de R^2 arrojado por la gráfica linealizada ($Q_e/\ln C_e$) fue de 0,9547. El % promedio de adsorción del CA Cacao 16-30 M fue de 95,12; este promedio se calculó utilizando

solamente los valores (concentraciones de 300, 1000, 1500, 2000, 2500) linealizados de la gráfica $Q_e/\ln C_e$.

Tabla 17. Parámetros de adsorción del T80 sobre el CA de cacao 40-50M

| Parámetros de adsorción del T80 sobre el CA Cacao 40-50 M | | | | | |
|--|-------------------|-------------------|-----------------------|------------------|--------------|
| Concentraciones (mg/L) | Ce (µg/L)* | Ci (µg/L)* | % de adsorción | Qe (µg/L) | Ln Ce |
| 100 | 16423,15 | 92731,41 | 82,29 | - | - |
| 200 | 1272,46 | 190378,68 | 99,33 | 189106,22 | 7,15 |
| 300 | 2382,09 | 251066,79 | 99,05 | 248684,71 | 7,78 |
| 400 | 10618,94 | 345385,17 | 96,93 | 334766,23 | 9,27 |
| 500 | 21672,54 | 459548,82 | 95,28 | 437876,28 | 9,98 |
| 750 | 48090,23 | 708361,56 | 93,21 | 660271,34 | 10,78 |
| 1000 | 4558,67 | 977147,61 | 99,53 | - | - |
| 1500 | 59101,15 | 1198319,44 | 95,07 | - | - |
| 2000 | 25300,17 | 1922991,88 | 98,68 | - | - |
| 2500 | 13307,66 | 2089862,86 | 99,36 | - | - |

Nota: * µg/L significa microgramos por litro.

Para realizar los cálculos de n_T y K_T únicamente se tomaron en cuenta los datos de los puntos donde la gráfica estaba linealizada. El valor de n_T fue de $1,16 \times 10^5$, el valor de K_T fue de $3,15 \times 10^{-3}$, y el valor de R^2 arrojado por la gráfica linealizada ($Q_e/\ln C_e$) fue de 0,8907. El % promedio de adsorción del CA Cacao 40-50 M fue de 96,76; este promedio se calculó utilizando

solamente los valores (concentraciones de 200, 300, 400, 500, 750) linealizados de la gráfica Qe/LnCe.

Tabla 18. *Parámetros de adsorción del T80 sobre el CA comercial*

| Parámetros de adsorción del T80 sobre el CA Comercial | | | | | |
|--|-------------------|-------------------|-----------------------|------------------|--------------|
| Concentraciones (mg/L) | Ce (µg/L)* | Ci (µg/L)* | % de adsorción | Qe (µg/L) | Ln Ce |
| 100 | 26580,51 | 106174,98 | 74,97 | - | - |
| 200 | 24745,36 | 228447,45 | 89,17 | - | - |
| 300 | 25940,34 | 320930,68 | 91,92 | - | - |
| 400 | 17618,13 | 345683,92 | 94,9 | 328065,79 | 9,78 |
| 500 | 31189,74 | 457500,28 | 93,18 | 426310,54 | 10,35 |
| 750 | 23763,77 | 763117,44 | 96,89 | 739353,67 | 10,08 |
| 1000 | 39469,27 | 976848,86 | 95,96 | 937379,59 | 10,58 |
| 1500 | 55260,13 | 1342087,19 | 95,88 | - | - |
| 2000 | 82488,69 | 1925125,78 | 95,72 | - | - |
| 2500 | 437697,69 | 2387328,52 | 81,67 | 1949630,83 | 12,99 |

Nota: * µg/L significa microgramos por litro.

Para realizar los cálculos de n_T y K_T únicamente se tomaron en cuenta los datos de los puntos donde la gráfica estaba linealizada. El valor de n_T fue de $4,84 \times 10^5$, el valor de K_T fue de $1,30 \times 10^{-4}$, y el valor de R^2 arrojado por la gráfica linealizada (Qe/LnCe) fue de 0,9242. El % promedio de adsorción del CA Comercial fue de 92,52; este promedio se calculó utilizando

solamente los valores (concentraciones de 400, 500, 750, 1000, 2500) linealizados de la gráfica $Q_e/\ln C_e$.

En los cálculos de los coeficientes de correlación R^2 que se obtuvieron para cada modelo matemático utilizado (Tabla 19), se descubrió que el modelo matemático de Temkin es el de mayor coincidencia lineal ($R^2 = 0,7644$, promediado de todos los R^2 de Temkin para T80) y representa de mejor forma la adsorción del T80. Se decidió ajustar los datos experimentales obtenidos en función del modelo de Temkin y se graficaron las isothermas de adsorción, teniendo en cuenta este modelo en todas las pruebas realizadas. Esto se demuestra en la Figura 13.

Tabla 19. Coeficiente de correlación para la adsorción de T80

| Tipo de Carbón | Coeficiente de correlación (R^2) | | | Porcentaje de adsorción (%) |
|------------------|--------------------------------------|------------|--------|-----------------------------|
| | Langmuir | Freundlich | Temkin | |
| CA Café 16-30 M | 0,9051 | 0,9567 | 0,9868 | 91,94 |
| CA Café 40-50 M | 0,532 | 0,9064 | 0,0656 | 82,51 |
| CA Cacao 16-30 M | 0,9956 | 0,8996 | 0,9547 | 95,12 |
| CA Cacao 40-50 M | 0,9175 | 0,9692 | 0,8907 | 96,76 |
| CA Comercial | 0,7046 | 0,7658 | 0,9242 | 92,52 |

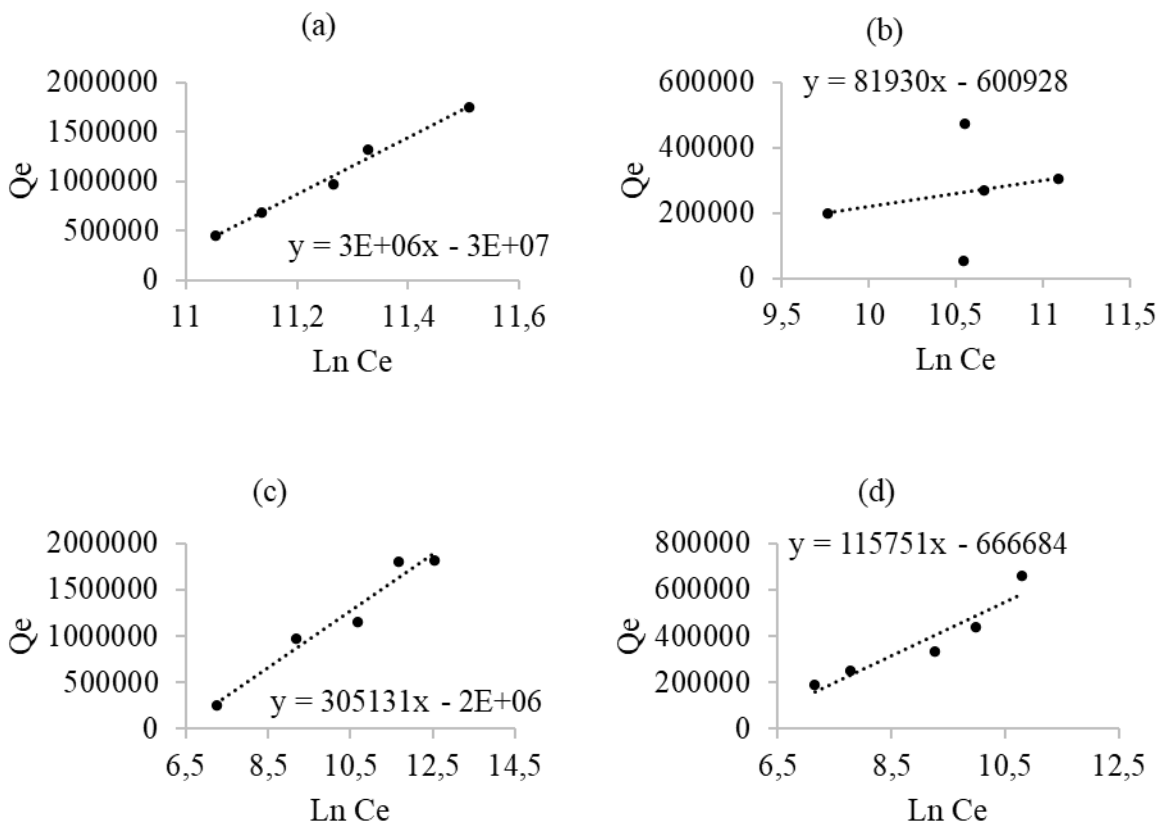
El carbón activado de cacao 40-50 M fue el carbón con la mayor efectividad de adsorción sobre el T80, con un porcentaje de remoción de 96,76%. En los surfactantes no iónicos, los carbones activados presentan una disminución de la adsorción al incrementar la cantidad de surfactante con el que entran en contacto. Schwuger y Smolka (1977) evaluaron que la capacidad de adsorción de los éteres de p-n-octilfenol-poliglicol en el carbón activado disminuye al

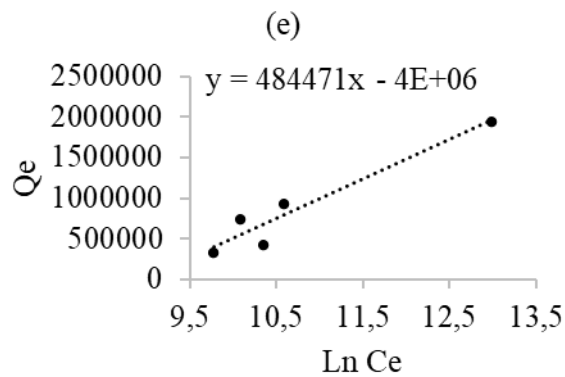
incrementar la cantidad de surfactante. Esta disminución es lineal, habiendo visualizado que esto ocurre igualmente en interfases líquidas y la adsorción de saturación cambia al modificar la cantidad de surfactante.

Carberry et al. (1977) investigaron que surfactantes no iónicos como anillos de tetrahidrofurano con tres o cuatro sustituciones de cadenas de etoxilato o éster alquílico se adsorbían sobre arcillas y carbón activado. La concentración de estos surfactantes en las aguas residuales industriales diluidas eran altas, con cientos de mg/L, con una concentración miscelar crítica alta; donde seguramente prevalecían las micelas.

Figura 13.

Isotermas de adsorción del T80 según el modelo matemático de Temkin.





Nota. Las curvas linealizadas para: (a) CA Café 16-30 M, (b) CA Café 40-50 M, (c) CA Cacao 16-30 M, (d) CA Cacao 40-50 M, (e) CA Comercial.

La alta toxicidad y fuerte tendencia a la sorción hacen que los surfactantes aniónicos y catiónicos no sean opciones atractivas para tratar sitios contaminados (Kim et al., 2005; Yang et al., 2010). Sin embargo, los surfactantes no iónicos se contemplan como candidatos atractivos para la aplicación de métodos de remediación mejorada con tensoactivos, debido a su toxicidad relativamente baja y una capacidad de sorción media (Yang et al., 2010). En estudios anteriores se ha probado que el surfactante no iónico Tween 80 (T80) es efectivo cuando se desea tratar la contaminación de suelos y aguas por disolventes orgánicos clorados (Pennell et al., 1993).

Kang y Jeong (2015) estudiaron el comportamiento del Tween 80 sobre minerales como sílice, alúmina, hematita, plagioclasa, caolinita, vermiculita y montmorillonita. El objetivo fue examinar o evaluar la capacidad de adsorción del Tween 80 en presencia de varios minerales, teniendo en cuenta la composición de los átomos, estructura de los minerales y la materia orgánica. Se tuvo como resultado que el Tween 80 en aluminosilicatos, se adsorbe principalmente en las capas intermedias de la montmorillonita; en las hematitas, se absorbe en algunos sitios de la superficie; en minerales arcillosos se absorbe completamente, incluso en

bajas cantidades de arcillas, esto debido a su composición atómica. La adsorción de surfactantes en suelos puede provocar efectos no deseados como la falta de disponibilidad de surfactantes adsorbidos para la solubilización micelar y la reducción de permeabilidad de los acuíferos.

En la Tabla 20 se muestran los parámetros calculados con los modelos matemáticos escogidos para medir la adsorción del Tween 80 con los diferentes tipos de carbón activado.

Tabla 20. *Parámetros de las isothermas de Langmuir, Freundlich y Temkin para la adsorción del T80*

| Tipo de carbón | Parámetros | | |
|--------------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| <i>Langmuir</i> | q_{\max} | K_L | R^2 |
| CA Café 16-30 M | -4,11E+05 | -8,72E-06 | 0,9051 |
| CA Café 40-50 M | 1,54E+05 | -4,74E-03 | 0,00001 |
| CA Cacao 16-30 M | 1,70E+06 | 1,23E-04 | 0,9956 |
| CA Cacao 40-50 M | 4,90E+05 | 4,73E-04 | 0,9175 |
| CA Comercial | 3,07E+06 | 7,71E-06 | 0,7046 |
| <i>Freundlich</i> | n | K_F | R^2 |
| CA Café 16-30 M | 3,37E-01 | 2,80E-09 | 0,9567 |
| CA Café 40-50 M | 3,28E+00 | 8,55E+03 | 0,032 |
| CA Cacao 16-30 M | 2,71E+00 | 2,22E+04 | 0,8996 |
| CA Cacao 40-50 M | 3,16E+00 | 1,97E+04 | 0,9692 |
| CA Comercial | 2,10E+00 | 4,28E+03 | 0,7658 |
| <i>Temkin</i> | n | K_T | R^2 |
| CA Café 16-30 M | 2,90E+06 | 1,84E-05 | 0,9868 |

| | | | |
|------------------|----------|----------|--------|
| CA Café 40-50 M | 8,19E+04 | 6,53E-04 | 0,0656 |
| CA Cacao 16-30 M | 3,05E+05 | 1,78E-03 | 0,9547 |
| CA Cacao 40-50 M | 1,16E+05 | 3,15E-03 | 0,8907 |
| CA Comercial | 4,84E+05 | 1,30E-04 | 0,9242 |

De acuerdo con los resultados según las isotermas de Temkin, en las constantes K de los diferentes carbones activados, se evidencia un mayor valor de K en los carbones activados de cacao, siendo el de tamaño 40-50 M el más alto con un K de $3,15 \times 10^{-3}$; un valor de K alto representa elevados niveles de energía de adsorción, lo que da a entender que, en los resultados se obtendrán mayores porcentajes de remoción si el tamaño de grano del material o biomasa original es de un tamaño de poro diminuto. Esto se hace evidente en el máximo porcentaje de remoción presentado en las pruebas de adsorción del T80 que coincide con el carbón activado Cacao 40-50 M con una eficiencia de remoción del 96,76%.

4.6.2 Adsorción del RTE en carbón activado

Para establecer los parámetros de la adsorción del RTE sobre los carbones activados y calcular Q_e , n_T y K_T (Tabla 21, Tabla 22, Tabla 23, Tabla 24 y Tabla 25), se efectuaron la Ecuación (9), Ecuación (10) y Ecuación (11) según el modelo de Temkin.

Tabla 21. Parámetros de adsorción del RTE sobre el CA café 16-30M

| Parámetros de adsorción del RTE sobre el CA Café 16-30 M | | | | | |
|--|---------------|------------|----------------|------------|-------|
| Concentración (mg/L) | Ce (µg/L)* | Ci (µg/L)* | % de adsorción | Qe (µg/L) | Ln Ce |
| 100 | 32621,88 | 74124,78 | 55,99 | - | - |
| 200 | 33008,55 | 152637,81 | 78,37 | - | - |
| 300 | 41091,86 | 242345,95 | 83,04 | - | - |
| 400 | 36378,13 | 321687,57 | 88,69 | - | - |
| 500 | 28589,43 | 438462,81 | 93,48 | 409873,38 | 10,26 |
| 750 | 50500,9 | 674407 | 92,51 | 623906,09 | 10,83 |
| 1000 | 38587,69 | 694403,51 | 94,44 | 655815,82 | 10,56 |
| 1500 | 116088,01 | 1225877,98 | 90,53 | 1109789,97 | 11,66 |
| 2000 | 222588,8 | 1643668,95 | 86,46 | 1421080,15 | 12,31 |
| 2500 | 168804,43 | 2011928,95 | 91,61 | - | - |

Nota: * µg/L significa microgramos por litro.

Para realizar los cálculos de n_T y K_T únicamente se tomaron en cuenta los datos de los puntos donde la gráfica estaba linealizada. El valor de n_T fue de $4,82 \times 10^5$, el valor de K_T fue de $8,49 \times 10^{-5}$, y el valor de R^2 arrojado por la gráfica linealizada ($Q_e/\ln C_e$) fue de 0,9801. El % promedio de adsorción del CA Café 16-30 M fue de 91,48; este promedio se calculó utilizando solamente los valores (concentraciones de 500, 750, 1000, 1500, 2000) linealizados de la gráfica $Q_e/\ln C_e$.

Tabla 22. *Parámetros de adsorción del RTE sobre el CA café 40-50M*

| Parámetros de adsorción del RTE sobre el CA Café 40-50 M | | | | | |
|---|-------------------|-------------------|---------------------------|------------------|--------------|
| Concentraciones (mg/L) | Ce (µg/L)* | Ci (µg/L)* | % de adsorción | Qe (µg/L) | Ln Ce |
| 100 | 26195,74 | 74124,78 | 64,66 | 47929,04 | 10,17 |
| 200 | 10323,74 | 152637,81 | 93,24 | - | - |
| 300 | 26306,22 | 242345,95 | 89,15 | - | - |
| 400 | 41478,53 | 321687,57 | 87,11 | 280209,03 | 10,63 |
| 500 | 74934,95 | 438462,81 | 82,91 | 363527,86 | 11,22 |
| 750 | 101118,24 | 674407 | 85,01 | 573288,76 | 11,52 |
| 1000 | 131113,02 | 694403,51 | 81,12 | 563290,5 | 11,78 |
| 1500 | 225995,21 | 1225877,98 | 81,56 | - | - |
| 2000 | 13619,66 | 1643668,95 | 99,17 | - | - |
| 2500 | 10636,76 | 2011928,95 | 99,47 | - | - |

Nota: * µg/L significa microgramos por litro.

Para realizar los cálculos de n_T y K_T únicamente se tomaron en cuenta los datos de los puntos donde la gráfica estaba linealizada. El valor de n_T fue de $3,21 \times 10^5$, el valor de K_T fue de $4,87 \times 10^{-5}$, y el valor de R^2 arrojado por la gráfica linealizada ($Q_e/\ln C_e$) fue de 0,9402. El % promedio de adsorción del CA Café 40-50 M fue de 80,16; este promedio se calculó utilizando solamente los valores (concentraciones de 100, 400, 500, 750, 1000) linealizados de la gráfica $Q_e/\ln C_e$.

Tabla 23. *Parámetros de adsorción del RTE sobre el CA cacao 16-30M*

| Parámetros de adsorción del RTE sobre el CA Cacao 16-30 M | | | | | |
|--|-------------------|-------------------|---------------------------------|------------------|--------------|
| Concentraciones (mg/L) | Ce (µg/L)* | Ci (µg/L)* | % de adsorción | Qe (µg/L) | Ln Ce |
| 100 | 12275,52 | 91267,29 | 86,55 | - | - |
| 200 | 9274,2 | 192538,79 | 95,18 | 183264,59 | 9,13 |
| 300 | 10029,13 | 220508,13 | 95,45 | 210479 | 9,21 |
| 400 | 24814,77 | 311873,44 | 92,04 | 287058,67 | 10,12 |
| 500 | 29307,54 | 438333,92 | 93,31 | 409026,38 | 10,29 |
| 750 | 7819,57 | 594531,4 | 98,68 | - | - |
| 1000 | 8905,94 | 934952,58 | 99,05 | - | - |
| 1500 | 6328,12 | 1430998,8 | 99,56 | - | - |
| 2000 | 222054,82 | 1679206,04 | 86,78 | 1457151,22 | 12,31 |
| 2500 | 129695,22 | 2140635,82 | 93,94 | - | - |

Nota: * µg/L significa microgramos por litro.

Para realizar los cálculos de n_T y K_T únicamente se tomaron en cuenta los datos de los puntos donde la gráfica estaba linealizada. El valor de n_T fue de $4,03 \times 10^5$, el valor de K_T fue de $1,30 \times 10^{-4}$, y el valor de R^2 arrojado por la gráfica linealizada ($Q_e/\ln C_e$) fue de 0,9273. El % promedio de adsorción del CA Cacao 16-30 M fue de 92,55; este promedio se calculó utilizando solamente los valores (concentraciones de 200, 300, 400, 500, 2000) linealizados de la gráfica $Q_e/\ln C_e$.

Tabla 24. *Parámetros de adsorción del RTE sobre el CA cacao 40-50M*

| Parámetros de adsorción del RTE sobre CA Cacao 40-50 M | | | | | |
|---|-------------------|-------------------|---------------------------|------------------|--------------|
| Concentraciones (mg/L) | Ce (µg/L)* | Ci (µg/L)* | % de adsorción | Qe (µg/L) | Ln Ce |
| 100 | 27944,98 | 91267,29 | 69,38 | - | - |
| 200 | 17615,29 | 192538,79 | 90,85 | 174923,5 | 9,78 |
| 300 | 21187,41 | 220508,13 | 90,39 | 199320,73 | 9,96 |
| 400 | 41717,9 | 311873,44 | 86,62 | - | - |
| 500 | 35586,37 | 438333,92 | 91,88 | 402747,55 | 10,48 |
| 750 | 27208,46 | 594531,4 | 95,42 | 567322,94 | 10,21 |
| 1000 | 52820,94 | 934952,58 | 94,35 | 882131,64 | 10,87 |
| 1500 | 24851,59 | 1430998,8 | 98,26 | - | - |
| 2000 | 13693,32 | 1679206,04 | 99,18 | - | - |
| 2500 | 9218,96 | 2140635,82 | 99,57 | - | - |

Nota: * µg/L significa microgramos por litro.

Para realizar los cálculos de n_T y K_T únicamente se tomaron en cuenta los datos de los puntos donde la gráfica estaba linealizada. El valor de n_T fue de $6,09 \times 10^5$, el valor de K_T fue de $7,27 \times 10^{-5}$, y el valor de R^2 arrojado por la gráfica linealizada ($Q_e/\ln C_e$) fue de 0,8162. El % promedio de adsorción del CA Cacao 40-50 M fue de 92,58; este promedio se calculó utilizando solamente los valores (concentraciones de 200, 300, 500, 750, 1000) linealizados de la gráfica $Q_e/\ln C_e$.

Tabla 25. *Parámetros de adsorción del RTE sobre el CA comercial*

| Parámetros de adsorción del RTE sobre el CA Comercial | | | | | |
|--|-------------------|-------------------|---------------------------------|------------------|--------------|
| Concentraciones (mg/L) | Ce (µg/L)* | Ci (µg/L)* | % de adsorción | Qe (µg/L) | Ln Ce |
| 100 | 15939,7 | 95078,78 | 83,24 | - | - |
| 200 | 20414,06 | 195392,8 | 89,55 | 174978,74 | 9,92 |
| 300 | 29583,74 | 235956,64 | 87,46 | - | - |
| 400 | 33063,79 | 303035,2 | 89,09 | 269971,41 | 10,41 |
| 500 | 42307,12 | 415464,98 | 89,82 | 373157,86 | 10,65 |
| 750 | 68913,9 | 607937,7 | 88,66 | - | - |
| 1000 | 83128,74 | 927587,38 | 91,04 | 844458,64 | 11,33 |
| 1500 | 175562 | 1365080,26 | 87,14 | 1189518,26 | 12,08 |
| 2000 | 67551,34 | 1661161,3 | 95,93 | - | - |
| 2500 | 48291,34 | 2108965,46 | 97,71 | - | - |

Nota: * µg/L significa microgramos por litro.

Para realizar los cálculos de n_T y K_T únicamente se tomaron en cuenta los datos de los puntos donde la gráfica estaba linealizada. El valor de n_T fue de $5,06 \times 10^5$, el valor de K_T fue de $5,82 \times 10^{-5}$, y el valor de R^2 arrojado por la gráfica linealizada ($Q_e/\ln C_e$) fue de 0,9722. El % promedio de adsorción del CA Comercial fue de 89,33; este promedio se calculó utilizando solamente los valores (concentraciones de 200, 400, 500, 1000, 1500) linealizados de la gráfica $Q_e/\ln C_e$.

En la Tabla 26 se utilizaron los modelos matemáticos de Langmuir, Freundlich y Temkin para realizar una comparación del modelo que proporciona una compatibilidad en el equilibrio con respecto a los resultados experimentales de adsorción del RTE de una mejor manera. Se escogió el modelo de Temkin debido a que el R^2 (0,9272, promediado de todos los R^2 de Temkin para RTE) para estos datos fue el más adecuado, lo cual se demuestra en la Figura 14.

Tabla 26. *Coefficiente de correlación para la adsorción de RTE*

| Tipo de Carbón | Coeficiente de correlación (R^2) | | | Porcentaje de adsorción (%) |
|------------------|--------------------------------------|------------|--------|-----------------------------|
| | Langmuir | Freundlich | Temkin | |
| CA Café 16-30 M | 0,9367 | 0,9444 | 0,9801 | 91,48 |
| CA Café 40-50 M | 0,8205 | 0,8249 | 0,9402 | 80,16 |
| CA Cacao 16-30 M | 0,9264 | 0,9831 | 0,9273 | 92,55 |
| CA Cacao 40-50 M | 0,8509 | 0,8201 | 0,8162 | 92,58 |
| CA Comercial | 0,9927 | 0,9710 | 0,9722 | 89,33 |

El carbón activado de cacao 40-50 M fue el carbón con la mayor efectividad al tener interacción en el proceso de adsorción con el RTE, con un porcentaje de remoción de 92,58%. Zhang et al., (2012) estudiaron la influencia de la concentración idónea del bromuro de cetiltrimetilamonio (CTAB) en el tamaño y la superficie de los poros en los carbonos activados y su asociación con la estabilidad cíclica, la baja resistencia y alta capacitancia, encontrándose que existe una relación directa entre la concentración del surfactante, el área específica y el tamaño de poro con las propiedades internas antes mencionadas del tensoactivo catiónico.

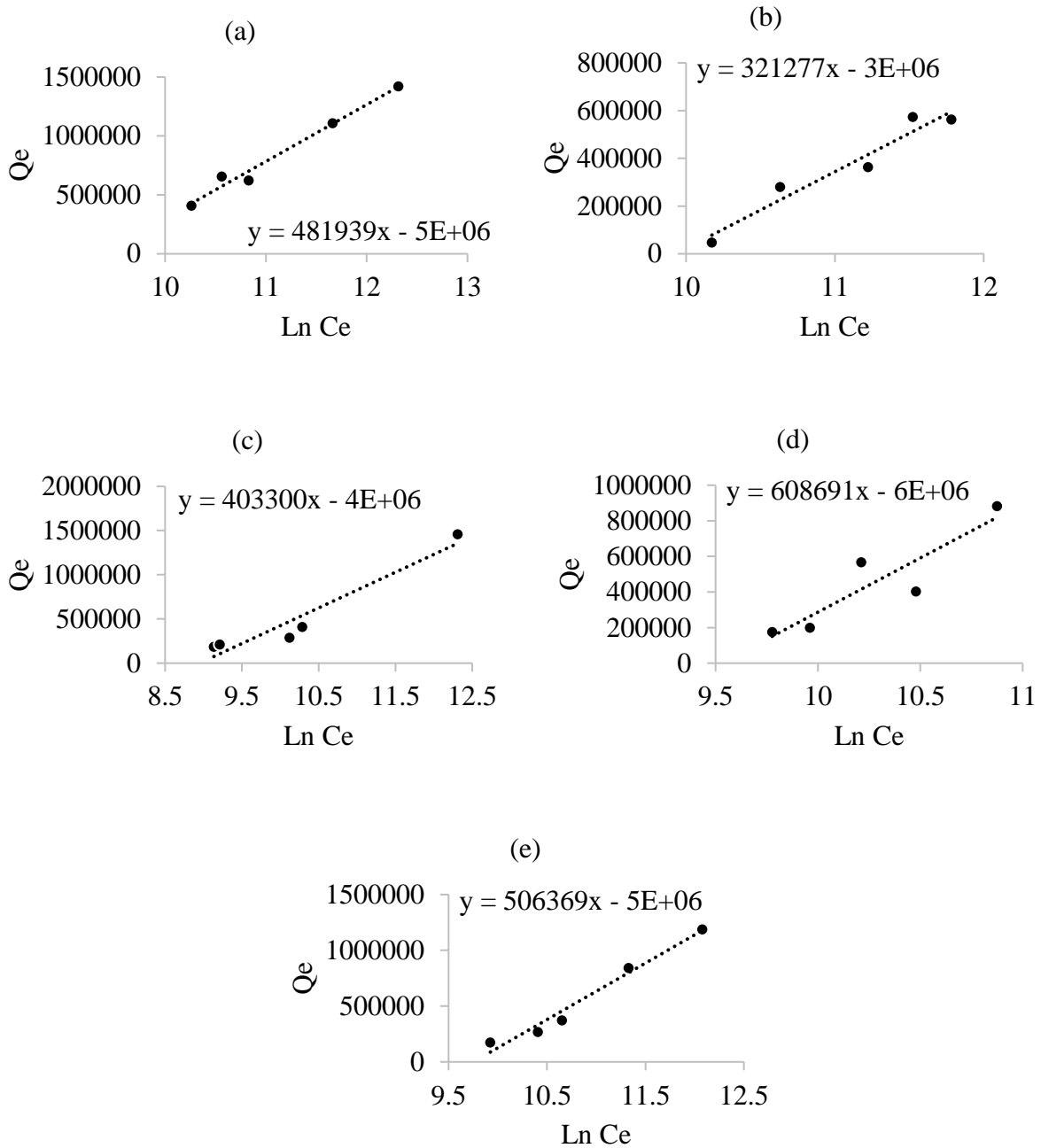
Las interacciones directas entre el tensioactivo y el carbón activado podrían ser mediante enlace hidrofóbico, puentes de hidrógeno, dispersión de fuerzas, atracción electrostática e intercambio iónico reemplazando contraiones (Cheremisioff y Ellerbusch, 1978).

Xiao et al. (2005) estudiaron la adsorción de carbones activados sobre una mezcla de surfactantes catiónicos y aniónicos, encontrando que el incremento de oxígenos en el carbón activado resultó en una superficie cada vez más hidrófila; esto se debió a las interacciones hidrofóbicas superficie/soluto.

Yalçın et al. (2004) evaluaron la cinética de adsorción del CTAB y sus partículas mediante un sistema en agitación. Debido a la baja tasa de muestreo, la cinética fue difícil de determinar, pero es de conocimiento que el flujo de un líquido incrementa la transferencia de masa si en el proceso se involucran fuerzas de difusión, mejorando su disolución en el disolvente.

Figura 14.

Isotermas de adsorción del RTE según el modelo matemático de Temkin.



Nota. Las curvas linealizadas para: (a) CA Café 16-30 M, (b) CA Café 40-50 M, (c) CA Cacao 16-30 M, (d) CA Cacao 40-50 M, (e) CA Comercial.

Gürses et al. (2009) estudiaron la adsorción del tensioactivo CTAB sobre arcilla en un sistema agitado y determinaron que el equilibrio dependía de la velocidad de agitación. La tasa de muestreo fue muy baja, razón por la cual se pensó que el equilibrio se había establecido antes de que se utilizara la primera muestra. Las concentraciones iniciales utilizadas fueron 30–210 mg/L, sin embargo, las concentraciones en equilibrio reportadas fueron menos de 1 mg/L.

Stevenson et al. (2011) evaluaron que la cinética de adsorción de CTAB sobre carbón activado afectaba a las partículas en un recipiente agitado; gracias a una línea que medía la conductividad del sobrenadante se pudo controlar la concentración, y así, determinar la adsorción cinética en donde solo estaba la adsorción en equilibrio, incluso al ser un proceso rápido. Esta investigación destacó como influía la concentración del surfactante con respecto a los tiempos de adsorción.

En la Tabla 27 se muestran los parámetros calculados con los modelos matemáticos escogidos para medir la adsorción del RTE con los diferentes tipos de carbón activado.

Tabla 27. *Parámetros de las isothermas de Langmuir, Freundlich y Temkin en la adsorción del RTE*

| Tipo de carbón | Parámetros | | |
|-----------------------|-------------------|-----------|--------|
| <i>Langmuir</i> | q_{max} | K_L | R^2 |
| CA Café 16-30 M | 2,27E+06 | 8,30E-06 | 0,9367 |
| CA Café 40-50 M | -2,04E+05 | -8,28E-06 | 0,8205 |
| CA Cacao 16-30 M | 9,75E+05 | 2,51E-05 | 0,9264 |
| CA Cacao 40-50 M | -6,81E+05 | -1,18E-05 | 0,8509 |
| CA Comercial | -1,10E+08 | -7,74E-08 | 0,9927 |

| <i>Freundlich</i> | n | K_F | R² |
|-------------------|----------|----------------------|----------------------|
| CA Café 16-30 M | 1,76E+00 | 1,37E+03 | 0,9444 |
| CA Café 40-50 M | 7,09E-01 | 4,56E-02 | 0,8249 |
| CA Cacao 16-30 M | 1,56E+00 | 5,16E+02 | 0,9831 |
| CA Cacao 40-50 M | 6,97E-01 | 1,49E-01 | 0,8201 |
| CA Comercial | 1,07E+00 | 1,74E+01 | 0,971 |
| <i>Temkin</i> | n | K_T | R² |
| CA Café 16-30 M | 4,82E+05 | 8,49E-05 | 0,9801 |
| CA Café 40-50 M | 3,21E+05 | 4,87E-05 | 0,9402 |
| CA Cacao 16-30 M | 4,03E+05 | 1,30E-04 | 0,9273 |
| CA Cacao 40-50 M | 6,09E+05 | 7,27E-05 | 0,8162 |
| CA Comercial | 5,06E+05 | 5,82E-05 | 0,9722 |

Según las isothermas de Temkin, se pudo observar que el K más alto se encontró en el carbón activado de Cacao 16-30 M, siendo este de $1,30 \times 10^{-4}$; igualmente se observó que el Cacao 40-50 M y el Café 16-30 M tienen valores de K altos, esto se visualiza mejor en los porcentajes de remoción donde estos tres carbones activados tuvieron porcentajes de remoción muy parecidos. Café 16-30 M, Cacao 16-30 M y Cacao 40-50 M con eficiencias de remoción de 91,48%, 92,55 % y 92,58%, respectivamente.

4.6.3 Adsorción del SDBS en carbón activado

Para establecer los parámetros de la adsorción del SDBS sobre los carbones activados y calcular Q_e , n_T y K_T (Tabla 28, Tabla 29, Tabla 30, Tabla 31 y Tabla 32), se efectuaron la Ecuación (9), Ecuación (10) y Ecuación (11) según el modelo de Temkin.

Tabla 28. *Parámetros de adsorción del SDBS sobre el CA café 16-30M*

| Parámetros de adsorción del SDBS sobre el CA Café 16-30 M | | | | | |
|--|-------------------|-------------------|---------------------------|------------------|--------------|
| Concentraciones (mg/L) | Ce (µg/L)* | Ci (µg/L)* | % de adsorción | Qe (µg/L) | Ln Ce |
| 5 | 5557,79 | 5670,88 | 1,99 | - | - |
| 10 | 6371,11 | 10163,7 | 37,32 | - | - |
| 20 | 6349,37 | 21454,48 | 70,41 | - | - |
| 40 | 6875,63 | 42122,36 | 83,68 | - | - |
| 60 | 6558,13 | 60206,75 | 89,11 | 53648,62 | 8,79 |
| 80 | 6923,47 | 77125,52 | 91,02 | 70202,05 | 8,84 |
| 100 | 6471,15 | 110384,62 | 94,14 | - | - |
| 200 | 8924,15 | 263300,5 | 96,61 | - | - |
| 300 | 9911,44 | 350938,9 | 97,18 | 341027,45 | 97,18 |
| 500 | 15774,3 | 592020,6 | 97,34 | 576246,3 | 97,34 |
| 1000 | 28965,73 | 1196051,38 | 97,58 | 1167085,65 | 97,58 |
| 2000 | 108053,4 | 1252113,86 | 91,37 | - | - |

Nota: * µg/L significa microgramos por litro.

Para realizar los cálculos de n_T y K_T únicamente se tomaron en cuenta los datos de los puntos donde la gráfica estaba linealizada. El valor de n_T fue de $7,33 \times 10^5$, el valor de K_T fue de $1,58 \times 10^{-4}$, y el valor de R^2 arrojado por la gráfica linealizada ($Q_e/\ln C_e$) fue de 0,9854. El % promedio de adsorción del CA Café 16-30 M fue de 94,44; este promedio se calculó utilizando solamente los valores (concentraciones de 60, 80, 300, 500, 1000) linealizados de la gráfica $Q_e/\ln C_e$.

Tabla 29. *Parámetros de adsorción del SDBS sobre el CA café 40-50M*

| Parámetros de adsorción del SDBS sobre el CA Café 40-50 M | | | | | |
|--|-------------------|-------------------|---------------------------|------------------|--------------|
| Concentraciones (mg/L) | Ce (µg/L)* | Ci (µg/L)* | % de adsorción | Qe (µg/L) | Ln Ce |
| 5 | 464,76 | 5670,88 | 91,8 | - | - |
| 10 | 34,18 | 10163,7 | 99,66 | - | - |
| 20 | 325,59 | 21454,48 | 98,48 | - | - |
| 40 | 0 | 42122,36 | 100 | - | - |
| 60 | 1191,1 | 60206,75 | 98,02 | 59015,65 | 7,08 |
| 80 | 464,76 | 77125,52 | 99,4 | - | - |
| 100 | 1900,03 | 110384,62 | 98,28 | 108484,59 | 7,55 |
| 200 | 2252,33 | 263300,5 | 99,14 | - | - |
| 300 | 6366,76 | 350938,9 | 98,19 | 344572,13 | 8,76 |
| 500 | 15469,85 | 592020,6 | 97,39 | 576550,75 | 9,65 |
| 1000 | 27038,99 | 1196051,38 | 97,74 | - | - |
| 2000 | 88351,07 | 1252113,86 | 92,94 | 1163762,79 | 11,39 |

Nota: * $\mu\text{g/L}$ significa microgramos por litro.

Para realizar los cálculos de n_T y K_T únicamente se tomaron en cuenta los datos de los puntos donde la gráfica estaba linealizada. El valor de n_T fue de $2,57 \times 10^5$, el valor de K_T fue de $7,99 \times 10^{-4}$, y el valor de R^2 arrojado por la gráfica linealizada ($Q_e/\ln C_e$) fue de 0,9749. El % promedio de adsorción del CA Café 40-50 M fue de 96,96; este promedio se calculó utilizando solamente los valores (concentraciones de 60, 100, 300, 500, 2000) linealizados de la gráfica $Q_e/\ln C_e$.

Tabla 30. *Parámetros de adsorción del SDBS sobre el CA cacao 16-30M*

| Parámetros de adsorción del SDBS sobre el CA Cacao 16-30 M | | | | | |
|--|-------------------------|-------------------------|-------------------|------------------------|-------|
| Concentraciones (mg/L) | Ce ($\mu\text{g/L}$)* | Ci ($\mu\text{g/L}$)* | % de adsorción | Qe ($\mu\text{g/L}$) | Ln Ce |
| 5 | 8,09 | 5366,42 | 99,85 | - | - |
| 10 | 804,01 | 9759,22 | 91,76 | - | - |
| 20 | 1425,96 | 21950,31 | 93,5 | - | - |
| 40 | 260,35 | 41269,9 | 99,37 | - | - |
| 60 | 769,21 | 61394,11 | 98,75 | - | - |
| 80 | 564,8 | 79021,82 | 99,29 | - | - |
| 100 | 129,87 | 95001,15 | 99,86 | - | - |
| 200 | 3570,16 | 205280,84 | 98,26 | 201710,68 | 8,18 |
| 300 | 5462,11 | 307097,95 | 98,22 | 301635,84 | 8,61 |
| 500 | 11538,08 | 480939,47 | 97,6 | 469401,39 | 9,35 |

| | | | | | |
|------|----------|------------|-------|------------|-------|
| 1000 | 34685,06 | 857023,45 | 95,95 | 822338,39 | 10,45 |
| 2000 | 77286,45 | 1239457,39 | 93,76 | 1162170,95 | 11,26 |

Nota: * $\mu\text{g/L}$ significa microgramos por litro.

Para realizar los cálculos de n_T y K_T únicamente se tomaron en cuenta los datos de los puntos donde la gráfica estaba linealizada. El valor de n_T fue de $3,08 \times 10^5$, el valor de K_T fue de $4,75 \times 10^{-4}$, y el valor de R^2 arrojado por la gráfica linealizada ($Q_e/\text{Ln}C_e$) fue de 0,9858. El % promedio de adsorción del CA Cacao 16-30 M fue de 96,76; este promedio se calculó utilizando solamente los valores (concentraciones de 200, 300, 500, 1000, 2000) linealizados de la gráfica $Q_e/\text{Ln}C_e$.

Tabla 31. *Parámetros de adsorción del SDBS sobre el CA cacao 40-50M*

| Parámetros de adsorción del SDBS sobre el CA Cacao 40-50 M | | | | | |
|---|---|---|------------------|--|--------------|
| Concentraciones | Ce ($\mu\text{g/L}$)* | Ci ($\mu\text{g/L}$)* | % de | Qe ($\mu\text{g/L}$) | Ln Ce |
| (mg/L) | | | adsorción | | |
| 5 | 469,11 | 5366,42 | 91,26 | - | - |
| 10 | 1212,84 | 9759,22 | 87,57 | - | - |
| 20 | 564,8 | 21950,31 | 97,43 | 21385,51 | 6,34 |
| 40 | 873,6 | 41269,9 | 97,88 | 40396,3 | 6,77 |
| 60 | 1512,94 | 61394,11 | 97,54 | 59881,16 | 7,32 |
| 80 | 316,89 | 79021,82 | 99,6 | - | - |
| 100 | 403,87 | 95001,15 | 99,57 | - | - |
| 200 | 3317,9 | 205280,84 | 98,38 | 201962,94 | 8,11 |

| | | | | | |
|------|----------|------------|-------|-----------|------|
| 300 | 15609,03 | 307097,95 | 94,92 | - | - |
| 500 | 21767,63 | 480939,47 | 95,47 | 459171,84 | 9,99 |
| 1000 | 48359,25 | 857023,45 | 94,36 | - | - |
| 2000 | 93043,96 | 1239457,39 | 92,49 | - | - |

Nota: * $\mu\text{g/L}$ significa microgramos por litro.

Para realizar los cálculos de n_T y K_T únicamente se tomaron en cuenta los datos de los puntos donde la gráfica estaba linealizada. El valor de n_T fue de $1,26 \times 10^5$, el valor de K_T fue de $1,56 \times 10^{-3}$, y el valor de R^2 arrojado por la gráfica linealizada ($Q_e/\text{Ln}C_e$) fue de 0,9704. El % promedio de adsorción del CA Cacao 40-50 M fue de 97,34; este promedio se calculó utilizando solamente los valores (concentraciones de 20, 40, 60, 200, 500) linealizados de la gráfica $Q_e/\text{Ln}C_e$.

Tabla 32. *Parámetros de adsorción del SDBS sobre el CA comercial*

| Parámetros de adsorción del SDBS sobre el CA Comercial | | | | | |
|--|-------------------------|-------------------------|----------------|------------------------|-------|
| Concentraciones (mg/L) | Ce ($\mu\text{g/L}$)* | Ci ($\mu\text{g/L}$)* | % de adsorción | Qe ($\mu\text{g/L}$) | Ln Ce |
| 5 | 116,82 | 5296,84 | 97,79 | - | - |
| 10 | 1130,21 | 9998,43 | 88,7 | - | - |
| 20 | 1517,29 | 22098,18 | 93,13 | 20580,89 | 7,32 |
| 40 | 2200,13 | 39934,66 | 94,49 | 37734,53 | 7,7 |
| 60 | 3296,16 | 60550,34 | 94,56 | - | - |
| 80 | 3135,23 | 79582,88 | 96,06 | - | - |

REMOCIÓN DE SURFACTANTES EN AGUAS DE PRODUCCIÓN CON CARBÓN
ACTIVADO SINTETIZADO A PARTIR DE BIOMASA VEGETAL 103

| | | | | | |
|------|----------|-----------|-------|-----------|-------|
| 100 | 2795,99 | 123971,84 | 97,74 | - | - |
| 200 | 7989,05 | 93444,1 | 91,45 | - | - |
| 300 | 8471,82 | 172617,6 | 95,09 | - | - |
| 500 | 8719,73 | 274695,67 | 96,83 | 265975,93 | 9,07 |
| 1000 | 18135,97 | 446319,66 | 96,1 | 446319,66 | 9,81 |
| 2000 | 71436,64 | 853392,39 | 92,28 | 853392,39 | 11,18 |

Nota: * $\mu\text{g/L}$ significa microgramos por litro.

Para realizar los cálculos de n_T y K_T únicamente se tomaron en cuenta los datos de los puntos donde la gráfica estaba linealizada. El valor de n_T fue de $2,15 \times 10^5$, el valor de K_T fue de $5,50 \times 10^{-4}$, y el valor de R^2 arrojado por la gráfica linealizada ($Q_e/\ln C_e$) fue de 0,9682. El % promedio de adsorción del CA Comercial fue de 94,56; este promedio se calculó utilizando solamente los valores (concentraciones de 20, 40, 500, 1000, 2000) linealizados de la gráfica $Q_e/\ln C_e$.

En la Tabla 33 se muestra la comparación de los modelos matemáticos de Langmuir, Freundlich y Temkin con el fin de determinar el modelo que mejor proporciona una compatibilidad en el equilibrio con respecto a los resultados experimentales de adsorción del SDBS, escogiéndose el modelo de Temkin debido a que su R^2 (0,9769, promediado de todos los R^2 de Temkin para SDBS) fue el más adecuado, cuyas isothermas se muestran en la Figura 15.

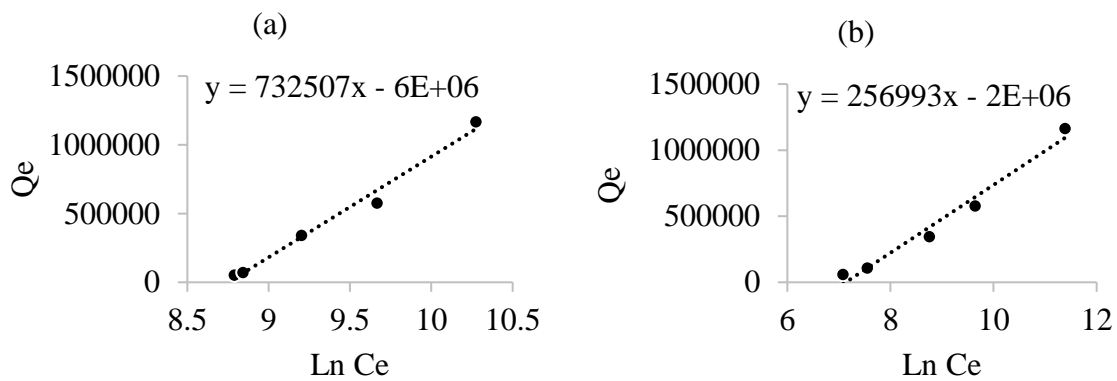
Tabla 33. *Coefficiente de correlación para la adsorción de SDBS*

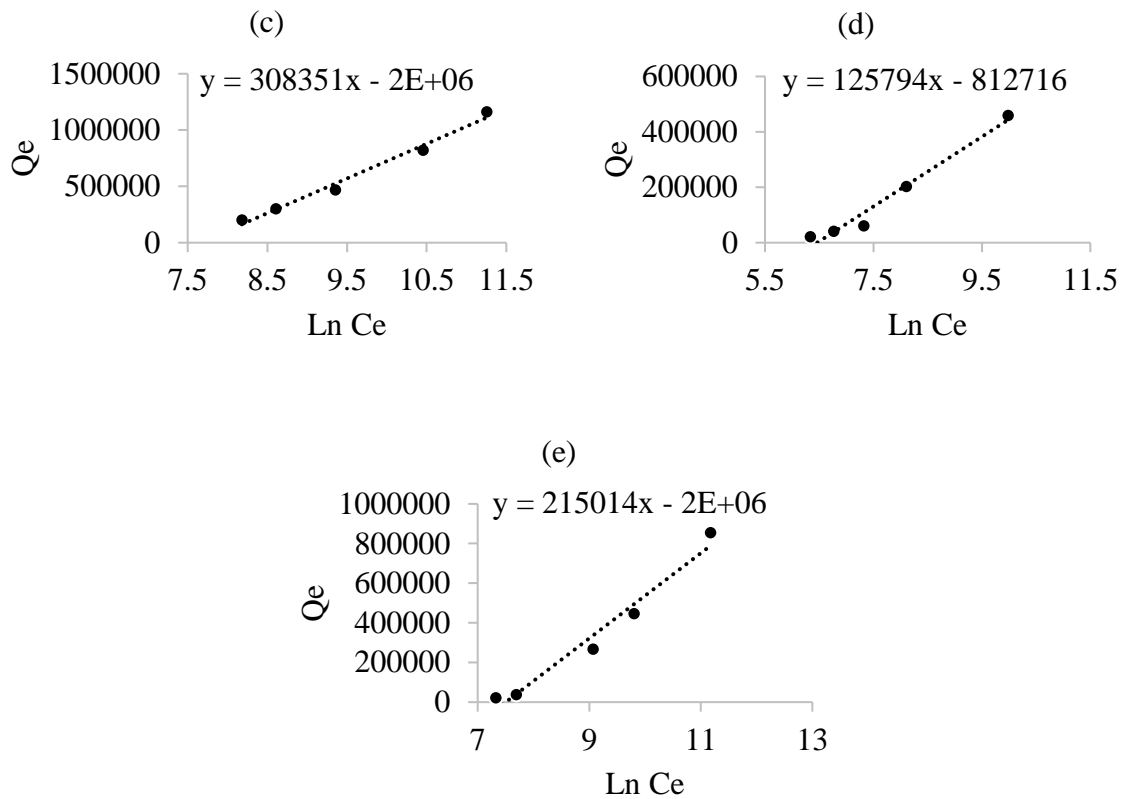
| Tipo de Carbón | Coeficiente de correlación (R^2) | | | Porcentaje de adsorción (%) |
|------------------|--------------------------------------|------------|--------|-----------------------------|
| | Langmuir | Freundlich | Temkin | |
| CA Café 16-30 M | 0,8415 | 0,8971 | 0,9854 | 94,44 |
| CA Café 40-50 M | 0,9894 | 0,9473 | 0,9749 | 96,96 |
| CA Cacao 16-30 M | 0,9962 | 0,9864 | 0,9858 | 96,76 |
| CA Cacao 40-50 M | 0,9797 | 0,9375 | 0,9704 | 97,34 |
| CA Comercial | 0,9779 | 0,9399 | 0,9682 | 94,56 |

El carbón activado de cacao 40-50M fue el carbón con la mayor efectividad de adsorción sobre el SDBS, con un porcentaje de remoción de 97,34%. Las fuerzas de interacción de los carbones activados con el SDBS son hidrófobas entre la cadena alifática de las moléculas del SDBS y la superficie del carbón. Entre los electrones π del anillo bencénico del SDBS y los electrones π de los planos grafénicos ocurren interacciones dispersivas (Méndez Díaz et al., 2008).

Figura 15.

Isotermas de adsorción del SDBS según el modelo matemático de Temkin.





Nota. Las curvas linealizadas para: (a) CA Café 16-30 M, (b) CA Café 40-50 M, (c) CA Cacao 16-30 M, (d) CA Cacao 40-50 M, (e) CA Comercial.

Pendleton et al. (1997), Considine et al. (2001) y Lee y Reucroft (1999) encontraron en sus investigaciones que la química de la superficie de los carbones activados tiene más incidencia que el tamaño de los poros cuando se quiere entender cómo funciona la adsorción de una molécula relativamente hidrófoba en un medio acuoso diluido. Igualmente, se estableció que las moléculas polares son las que más interactúan con los sitios polares de la superficie de un carbón activado.

Méndez Díaz et al (2008) estudiaron carbones activados comerciales, como Sorbo-Norit®, Merck® y Ceca AC40®, y un carbón activado preparado con cáscara de almendra, con un tamaño de partícula de 0,5 a 0,8 nm, para la adsorción de dodecilsulfonato sódico

(SDBS) en aguas. Los investigadores encontraron que estos carbones no presentaron una relación visible entre los valores de las constantes de velocidad de adsorción y las propiedades químicas y texturales de los carbones activados. No obstante, se observó que la velocidad de adsorción fue más alta en carbones activados con microporosidades más anchas y pH cercanos al pH del trabajo. Según sus resultados, llegaron a las conclusiones de que si se aumenta el volumen de microporos (más de 0,8 nm) del carbón activado, la capacidad de adsorción incrementa; si se disminuye la concentración de oxígeno, la capacidad de adsorción incrementa; si ocurre un incremento de la fuerza iónica de la disolución, se incrementa la capacidad de adsorción. Por otra parte, se encontró que el pH del medio no fue determinante en el proceso de adsorción del SDBS, por lo que las interacciones electrostáticas adsorbato-adsorbente no se vieron involucradas en el proceso de adsorción. Se encontró que los electrolitos, si son añadidos durante el proceso de adsorción, se reduce la solvatación de la parte hidrofílica del SDBS, ayudando al carbón activado; si se añade un electrolito durante el proceso de adsorción, se produce un aumento en la concentración de iones en la cercanía de la parte hidrofílica del SDBS, provocando un efecto pantalla que aminora las repulsiones electrostáticas adsorbato-adsorbato entre las secciones hidrofílicas de las moléculas de SDBS, beneficiando el proceso de adsorción.

En la Tabla 34 se muestran los parámetros calculados con los modelos matemáticos escogidos para medir la adsorción del SDBS con los diferentes tipos de carbón activado. El parámetro K estudiado según las isothermas de Temkin arrojó que el carbón activado con el K más alto fue el Cacao 40-50 M, siendo este de $1,56 \times 10^{-3}$; esto se visualiza mejor gracias al máximo porcentaje de remoción obtenido en el SDBS donde el Cacao 40-50 M fue el más eficiente de los carbones activados, con una eficiencia de remoción de 97,34%.

Tabla 34. Parámetros de las isothermas de Langmuir, Freundlich y Temkin en la adsorción del SDBS

| Tipo de carbón | Parámetros | | |
|--------------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| <i>Langmuir</i> | q_{\max} | K_L | R^2 |
| CA Café 16-30 M | -1,44E+05 | -4,71E-05 | 0,8415 |
| CA Café 40-50 M | 4,34E+06 | 1,21E-05 | 0,9894 |
| CA Cacao 16-30 M | 1,35E+06 | 4,97E-05 | 0,9962 |
| CA Cacao 40-50 M | -8,44E+05 | -4,59E-05 | 0,9797 |
| CA Comercial | -4,17E+05 | -3,30E-05 | 0,9779 |
| <i>Freundlich</i> | n | K_F | R^2 |
| CA Café 16-30 M | 4,91E-01 | 1,32E-03 | 0,8971 |
| CA Café 40-50 M | 1,46E+00 | 6,11E+02 | 0,9473 |
| CA Cacao 16-30 M | 1,80E+00 | 2,40E+03 | 0,9864 |
| CA Cacao 40-50 M | 1,19E+00 | 1,37E+02 | 0,9375 |
| CA Comercial | 1,01E+00 | 1,95E+01 | 0,9399 |
| <i>Temkin</i> | n | K_T | R^2 |
| CA Café 16-30 M | 7,33E+05 | 1,58E-04 | 0,9854 |
| CA Café 40-50 M | 2,57E+05 | 7,99E-04 | 0,9749 |
| CA Cacao 16-30 M | 3,08E+05 | 4,75E-04 | 0,9858 |
| CA Cacao 40-50 M | 1,26E+05 | 1,56E-03 | 0,9704 |
| CA Comercial | 2,15E+05 | 5,50E-04 | 0,9682 |

4.7 Efecto de la salinidad en la adsorción de surfactantes en carbón activado

En la presente investigación se analizó el efecto de la salinidad en la adsorción de surfactantes usando carbón activado. Para ello, se determinó si los carbones activados tenían la capacidad de adsorber únicamente la sal de cloruro de sodio (NaCl), por lo que se realizó pruebas de adsorción con una salmuera de NaCl a 10.000 mg/L y se halló la conductividad eléctrica (σ) de las disoluciones a temperatura ambiente (25 °C) antes y después de haber estado en contacto con los carbones activados, cuyos valores se encuentran relacionados en la Tabla 35 Asimismo, se obtuvo el porcentaje de reducción en la conductividad eléctrica (%R σ) de las disoluciones después de la adsorción con carbones activados mediante la Ecuación (12), donde σ_0 (mS/cm) es la conductividad inicial de la disolución y σ_f (mS/cm) es la conductividad final de la disolución (sobrenadante).

$$\%R\sigma = \left(\frac{\sigma_0 - \sigma_f}{\sigma_0} \right) * 100\% \quad (12)$$

Tabla 35. Conductividad de las disoluciones antes y después de la adsorción con CA

| Tipo de Carbón | Conductividad eléctrica σ (mS/cm) | Reducción de conductividad (%R σ) |
|----------------------------|---|--|
| Disolución de NaCl inicial | 17,34 | - |
| CA Café 16-30 M | 17,04 | 1,73 |
| CA Café 40-50 M | 16,90 | 2,53 |
| CA Cacao 16-30 M | 17,03 | 1,78 |
| CA Cacao 40-50 M | 16,92 | 2,42 |
| CA Comercial | 17,12 | 1,26 |

Se encontró que la presencia de sal disminuyó después del proceso de adsorción con los carbones activados; esto indica que hay una reducción de la conductividad y, por consiguiente, una adsorción de la sal por parte de los carbones activados. La conductividad es un medidor de iones, entre menos iones, menor conductividad. Teniendo en cuenta lo anterior, durante el proceso de adsorción en una disolución de surfactante en salmuera, ocurre una competencia o selectividad entre la cantidad de surfactante y la sal que se encuentran presentes; sin embargo, no es posible saber cuál compuesto se adsorbe en mayor o menor cantidad en el carbón activado.

Diferentes autores han estudiado la adsorción de sales empleando carbones activados. Díaz (2012) evaluó el uso de los carbones activados Norit DLC SUPER 50 (N) y AR24-5 (A) en la desalinización de aguas mediante desionización capacitiva (CDI), encontrando que los carbones activados de gran área superficial eran beneficiosos para ser usados como electrodos en la desalinización de aguas con CDI. Con esto se puede inferir que los carbones activados reaccionan de forma física o electroquímica con el NaCl alterando las propiedades de carbón activado.

Gasca (2016) estudió que la adición de cloruro de sodio (NaCl) y cloruro de calcio (CaCl_2) en carbones activados sirven para la recuperación de oro de lixiviados cianurados. Además, se propone que los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ , Li^+ , Na^+ , K^+ ayudan a este proceso mejorando su capacidad de adsorción (Davidson, 1974).

León et al. (2021) estudiaron la influencia de las sales de azul de metileno y del cloruro férrico afectaban a carbones activados sintetizados con cáscara de cacao en su capacidad de adsorción cinética, considerando el tiempo y a la temperatura; siendo las propiedades texturales y químicas lo que más incide en los resultados. Se pudo inferir que las sales como azul de metileno

y cloruro férrico tiene incidencia en el desempeño de los carbones activados, durante el proceso de adsorción de una sustancia o material.

Por consiguiente, la adsorción de surfactantes y la adsorción de sales se denominan variables independientes de estudio, ya que dicha selectividad influye directamente en los resultados de adsorción a obtener por parte de los CA sin una certeza establecida sobre el comportamiento sinérgico de las variables.

4.8 Análisis de factores en los escenarios de adsorción

Según los datos obtenidos, se pudo observar que los porcentajes promedios más altos para la remoción de surfactante T80, RTE y SDBS fueron con carbones activados de cacao 40-50 M; esto se fundamenta en que el área superficial de los granos entre 40 mesh (0,45 mm) y 50 mesh (0,355 mm), al ser de un tamaño más pequeño en comparación con el tamaño de grano de los otros carbones activados, la adsorción de los surfactantes en los poros del carbón activado es mayor.

Los carbones sintetizados con la biomasa residual de café y cacao presentaron un porcentaje de remoción significativo de surfactantes en las aguas siendo, en su mayoría, más efectivos que el carbón activado comercial. Esto demuestra que las propiedades de los carbones activados sintetizados representan una gran ventaja cuando se desea encontrar nuevas tecnologías que sirvan para filtrar o, en este caso, adsorber agentes tensioactivos aniónicos, catiónicos o no iónicos presentes en las aguas de producción; integrando como ventaja la reutilización eficiente de estos residuos agroindustriales con propuesta de valor hacia la economía circular enfocada en áreas de utilidad para otras industrias, como lo es la industria de

los hidrocarburos siendo estos los propulsores de una tecnología emergente para el tratamiento de aguas de producción o aguas contaminadas en general.

Con los carbones activados sintetizados en el laboratorio no se logró alcanzar un pH neutro; teniendo en consideración lo anterior, se visualizó un mayor porcentaje de adsorción del surfactante SDBS con todos los carbones activados en comparación con los mismos carbones y los surfactantes Tween 80 y Redicote (*Tabla 36*, *Tabla 37* y *Tabla 38*). El SDBS al ser un surfactante aniónico, posee cargas negativas; en la superficie del carbón activado hay una mayor presencia de cargas positivas debido a los iones hidronio (H_3O^+), por lo que las cargas negativas del SDBS, el anión sulfonato (SO_3^-), interaccionan más fácilmente con el carbón, lo que produjo una mayor atracción de las moléculas del SDBS hacia el carbón activado, ayudando así a su capacidad de adsorción.

Tabla 36. *Porcentaje de remoción de T80 por los CA*

| T80 | |
|-----------------------|-----------------------|
| Tipo de Carbón | % de adsorción |
| CA Café 16-30 M | 91,94 |
| CA Café 40-50 M | 82,51 |
| CA Cacao 16-30 M | 95,12 |
| CA Cacao 40-50 M | 96,76 |
| CA Comercial | 92,52 |
| Total | 91,77 |

Tabla 37. *Porcentaje de remoción del RTE por los CA*

| RTE | |
|-----------------------|-----------------------|
| Tipo de Carbón | % de adsorción |
| CA Café 16-30 M | 91,48 |
| CA Café 40-50 M | 80,16 |
| CA Cacao 16-30 M | 92,55 |
| CA Cacao 40-50 M | 92,58 |
| CA Comercial | 89,33 |
| Total | 89,22 |

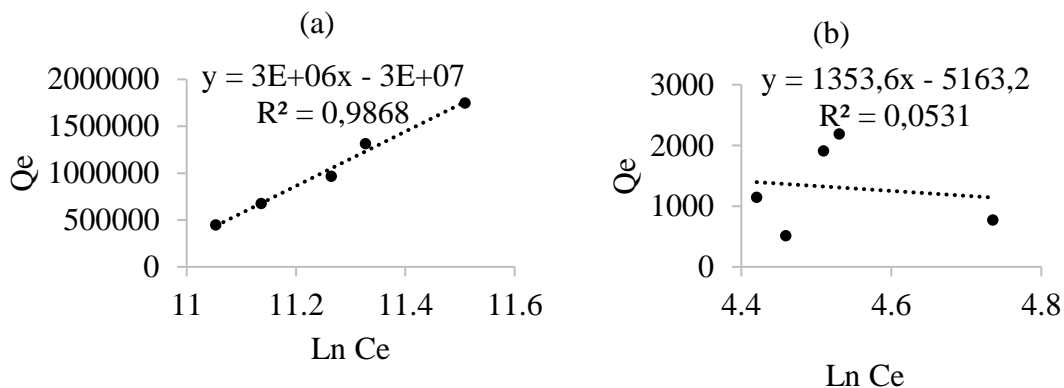
Tabla 38. *Porcentaje de remoción del SDBS por los CA*

| SDBS | |
|-----------------------|-----------------------|
| Tipo de Carbón | % de adsorción |
| CA Café 16-30 M | 94,44 |
| CA Café 40-50 M | 96,96 |
| CA Cacao 16-30 M | 96,76 |
| CA Cacao 40-50 M | 97,34 |
| CA Comercial | 94,56 |
| Total | 96,01 |

Durante la realización de las pruebas sin sal y con sal para cada respectivo surfactante se encontró que la sal provocaba una distorsión significativa en los puntos de las isothermas en las gráficas (Figura 16), por lo que se intuyó, que la sal además de cambiar la cinética de adsorción también interactúa químicamente con los carbones afectando su capacidad de adsorción, sin embargo, debido a que no se podía cuantificar que cantidad de sal era adsorbida durante los procesos, se optó por no tomar en cuenta las pruebas con sal en el análisis del comportamiento de los surfactantes junto con el carbón activado sintetizado. León et al. (2021) evaluaron como los carbones activados sintetizados a partir de biomasa de cacao eran afectados por sales como azul de metileno y cloruro férrico, donde se encontró que la adsorción de los carbones activados era afectada por la abundancia de los grupos funcionales OH, C=O, y -CO, la superficie de los carbones activado y la naturaleza química de los componentes que entran en contacto durante en proceso de adsorción; donde las sales en las pruebas llevadas a cabo afectaban la velocidad y capacidad de adsorción de los carbones activados.

Figura 16.

Gráfico de T80 sin sal y con sal.



Nota. Las curvas linealizadas para: (a) CA Café 16-30 M sin sal y (b) CA Café 40-50 M con sal

5. Conclusiones

Los materiales adsorbentes para la remoción de surfactantes en aguas de producción son muchos, por lo que hacer un análisis detallado que permita determinar la mejor tecnología para adsorber estos surfactantes es necesario. Igualmente, se debe tener en cuenta que los carbones activados siguen siendo una gran estrategia para la remoción de surfactantes y en algunas ocasiones, de otros compuestos contaminantes presentes en las aguas de producción.

El uso de biomasa residual de café y cacao para sintetizar carbones activados se puede visualizar como una alternativa para controlar el problema de la acumulación de estos residuos, que a su vez generan costos extra al buscar una forma de deshacerse de ellos por parte de las industrias; encontrar una alternativa para la biomasa residual donde se aprovechen sus beneficios como materia prima para carbón activado significa una forma creativa de manejar los residuos de biomasa de café y cacao.

Los carbones activados sintetizados presentaron un comportamiento mesoporoso que, a pesar de ser un tamaño de grano pequeño, demostró ser altamente eficiente en la capacidad de retención de los granos para adsorber los surfactantes, lo cual se ve reflejado con altos porcentajes de remoción.

Los carbones activados sintetizados a partir de biomasa residual vegetal de cacao y café resultaron siendo muy efectivos adsorbiendo T80, SDBS y RTE con un promedio de adsorción de 92,33 % entre los tres tipos de surfactante, teniendo en cuenta igualmente el carbón activado comercial. Sin embargo, es importante mencionar que la sal influye en la capacidad de adsorción de los carbones activados, debido a que la conductividad de las disoluciones se altera, por ende, ocurre una selectividad de adsorción en los carbones activados.

Se pudo visualizar en los resultados que el surfactante que mejor se adsorbió con los carbones activados fue el SDBS con un promedio de 96,01% de remoción con los tres tipos de carbón activado. Debido a que el carbón activado posee cargas positivas y el SDBS es un surfactante aniónico (con cargas negativas) la atracción de estos fue mayor.

6. Recomendaciones

El uso de ácido fosfórico en una proporción de 1:5 (volumen de H_3PO_4 /volumen de agua) como agente activante del carbón pudo afectar la capacidad de adsorción del carbón activado; por esto, se sugiere probar otra proporción en la cantidad de ácido fosfórico para comprobar si cambia la capacidad de adsorción de los carbones activados al utilizar una menor o mayor concentración de ácidos y, a su vez, corroborar la incidencia del pH en la capacidad de adsorción.

Para los carbones activados sintetizados no fue posible llevarlos a un pH neutro; en una futura investigación con el mismo procedimiento realizado, se podrían llevar los carbones activados a un pH neutro o básico y determinar si se presentan los mismos resultados de adsorción para los tres surfactantes estudiados.

Para un mayor detalle en las propiedades texturales de la biomasa empleada para la síntesis de carbones activados, se recomienda emplear otras técnicas de caracterización como la microscopía electrónica de barrido (SEM) para así determinar específicamente, y con alta resolución, el análisis composicional de la superficie de los materiales en estudio. A su vez, para la caracterización fisicoquímica, se sugiere utilizar técnicas de espectroscopía Raman, ya que esta técnica proporciona información sobre las vibraciones específicas de los enlaces químicos de la muestra en estudio, permitiendo la caracterización de su estructura molecular y composición química en general.

En las pruebas de remoción de surfactantes que se realizaron con 10.000 mg/L de NaCl hubo mucha distorsión en los puntos obtenidos al aplicarles los modelos matemáticos de Langmuir, Freunlich y Temkin, por lo que se recomienda realizar un estudio detallado y

específico en donde se establezca la retención del cloruro de sodio en el carbón activado durante el proceso de adsorción y su cuantificación. Tal como se visualizó en la sección 4.7, donde se mostró que una parte de la sal era adsorbida por el carbón activado, sin embargo, no era posible cuantificar que cantidad de sal exactamente se absorbía y en las gráficas con sal los puntos mostraban un comportamiento irregular.

El T80 al ser un surfactante no iónico, dependiendo del material con el que hace contacto puede reaccionar de diferentes formas; se podría realizar un estudio donde se mida la adsorción del T80 con diferentes tipos de carbón activado sintetizados (cáscara de coco, cáscara de piña, entre otros), así entender mejor su comportamiento a nivel químico, y el compuesto de activación que modifica la composición superficial del carbón.

7. Referencias Bibliográficas

- Abdel-Aal, H. K. (2013). Gas-oil separation. In *Petroleum Economics and Engineering*, Third Edition. <https://doi.org/10.1201/b16226>
- Al-deen Atallah Aljuboury, D., Palaniandy, P., Abdul Aziz, H., Dada, A., Aziz, A. H. (2017). Treatment of petroleum wastewater by conventional and new technologies A review Article in *Global Nest Journal* · Evaluating of performance of landfills of waste in Al-Amerat and Barka View project Soil and Municipal Solid Waste Leachate Characterization at Erbil Anaerobic Landfill Site View project Treatment of petroleum wastewater by conventional and new technologies-A review. In *Global NEST Journal* (Vol. 19, Issue X). <https://www.researchgate.net/publication/319645013>
- Al-Ghouti, M. A. Al-Kaabi, M.A. Ashfaq, M.Y. and Da'na, D.A. (2019). “Produced water characteristics, treatment and reuse: A review”. *Journal of Water Process Engineering*, 28, 222-239. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.02.0018>
- Al-Sabagh, A.M; Kandile, N; and Noor El-Din, M.R. (2011). “Functions of demulsifiers in the petroleum industry”. *Separation Science and Technology*, 46(7), 1144– 1163. DOI: :10.1080/01496395.2010.550595
- Al-Shamrani, A; James, A; and Xiao, H. (2002). “Separation of oil from water by dissolved air flotation”. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 209(1), 15– 26. doi:10.1016/s0927- 7757(02)00208-x
- Alvares, A.B.C; Diaper, C; and Parsons, S.A. (2001). “Partial oxidation by ozone to remove recalcitrance from wastewaters: A review”. *Environmental Technology*, 22(4), 409–427. DOI: 10.1080/09593332208618273

Alconsult International, (2005). Guía para la disposición y el tratamiento de agua producida.

Guía de ARPEL No. 1. Calgary, Canadá.

Abdurahman, H.N; Rosli, M.Y. and Zulkifly, J. (2007). “Chemical demulsification of water-in-crude oil emulsions”. *Journal of Applied Sciences*, 7: 196-201. DOI: 10.3923/jas.2007.196.201

Aparna, S. Gawade, A. Vanjara, K y Sawant, M (2004). Removal of herbicide from water with sodium chloride using surfactant treated alúmina for wastewater treatment. India;1-14 pp.

Azevedo, A; Oliveira, H.A; and Rubio, J. (2018). “Treatment and water reuse of lead-zinc sulphide ore mill wastewaters by high-rate dissolved air flotation”. *Minerals Engineering*, 127, 114–121. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.07.011

Basha, S; Murthy, Z.V.P; Jha, B. (2008). Sorption of Hg (II) from Aqueous Solutions onto Carica papaya: Application of Isotherms. *Ind Eng Chem Res* 47(3):980–986

Bayona, C. (2023). Análisis de tecnologías para el tratamiento de aguas de producción de la industria de hidrocarburos y su potencial uso en sistemas de riego.

Becerra, J. A. (2014). Modelo cinético para determinar parámetros cinéticos de la pirólisis de la cascarilla de café.

Camacho, J. (2020). *Evaluación del manejo del agua en la extracción y producción de hidrocarburos con miras a la definición de alternativas de tratamiento y reúso.*

Carmona, L. (2015). Water footprint for heavy oil extraction in Colombia: Relationship between oil and water. Society of Petroleum Engineers - SPE E and P Health, Safety, Security and Environmental Conference - Americas 2015.

<https://doi.org/10.2118/173552-ms>

Castro, M. R. (2004). *SISTEMAS DE TRATAMIENTOS DE AGUAS DE PROD.*

Carberry J. B., Twardowski C. J; and Eberhart D. K. (1977). Clay adsorption treatment of non-ionic surfacants in wastewaters. *J. Wat. Pollut. Control Fed.* 49, 452--459.

CESIO (2020). Industry data. <https://www.cesio.eu/index.php/information-centre/industry-data>

Coates, J. (2000). Interpretation of infrared spectra, a practical approach. *Encyclopedia of analytical chemistry*, 12, 10815-10837.

Considine, R., Denoyel, R., Pendleton, P., Schumann, R., and Wong, S.-H., (2001). *Colloids Surf. A* 179, 271.

Contreras, J. D., & Garnica, C. F. (2021). *Adsorción de COP's en CA con NPs*.

Cutiño, E., Medina, M., & Ortega, G. (2011). ANÁLISIS TERMOGRAVIMETRICO Y TÉRMICO BIOMASAS VEGETALES_Cutiño et al (2011). *Tecnología Química*, 36–43.

Cheremisioff, P.N; Ellerbush, F. (1978). *Carbon adsorption handbook*. Michigan: Ann Arbor Sci Publishers. p. 241–79.

Davidson, R.J. (1974). *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 75, 67 – 76.

Deng, Y; and Zhao, R. (2015). “Advanced oxidation processes (AOPs) in wastewater treatment”. *Current Pollution Reports*, 1(3), 167–176. DOI: 10.1007/ s40726-015-0015-z

Díaz, P., (2012). *Materiales de carbono para desalinización de aguas mediante desionización capacitiva*. Universidad de Oviedo. Departamento de Química Orgánica e Inorgánica. Instituto Nacional del Carbón.

Dordzie, G., & Dejam, M. (2021). Enhanced oil recovery from fractured carbonate reservoirs using nanoparticles with low salinity water and surfactant: A review on experimental and simulation studies. *Advances in Colloid and Interface Science*, 293, 102449.

Ecopetrol, 2016. *Reporte integrado de gestión sostenible 2015*. Bogotá.

Fakhru'l-Razi, A; Pendashteh, A; Abdullah, L.C; Biak, D.R.A; Madaeni, S.S; and Abidin, Z.Z.

(2009). "Review of technologies for oil and gas produced water treatment". Journal of Hazardous Materials, 170(2-3), 530-551. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.044>

Flores C. (2013). Materiales a base de carbono como adsorbentes de compuestos aromáticos en agua con diferentes grados de salinidad. Tesis del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, SLP. México

Gasca, J.A., (2016). Carbón activado de carácter básico para recuperar oro de lixiviados cianurados. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C. Posgrado en Ciencias Ambientales

García, R. (2009). Biosorption of Chromium (III) by agro-waste materials: characterization, sorption-desorption studies, mechanism, and adsorption kinetic experiments. Tesis del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, SLP. México.

García, R. A., & Granillo, Y. A. (2017). EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES OPERACIONALES EN EL PROCESO DE PREPARACIÓN DE CARBÓN ACTIVO DE CÁSCARA DE NARANJA. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE NICARAGUA.

Gilpavas, E; Arbeláez, E; Sierra, L; White, C; Oviedo, C; y Restrepo, P. (2008). "Aplicación de la electroquímica en el tratamiento de aguas residuales". Cuadernos de Investigación. Universidad EAFIT.

Gong, Y; and Zhao, D. (2017). "Effects of oil dispersant on ozone oxidation of phenanthrene and pyrene in marine water". Chemosphere, 172, 468–475. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2017.01.007](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.007)

Gürses, A., Karaca, S., Açıkyıldız, M; and Ejder, M. (2009). Chem. Eng. J. 147, 194.

Granada, M., Pérez-Cordoves, A. I., Díaz-García, M. E. (2006). Trends in Analytical Chemistry.
Vol. 25, No. 1.

Hayes, T; and Arthur, D. (2004). Overview of emerging produced water treatment technologies.
The 11th Annual International Petroleum Environmental Conference, Albuquerque, NM,
October 12-15. [https:// www.yumpu.com/en/document/read/33648850/ overview-of-emerging-produced-water-treatment-technologies-ipecc](https://www.yumpu.com/en/document/read/33648850/overview-of-emerging-produced-water-treatment-technologies-ipecc)

Heydari, A; Duraisamy, R; and Henni, A. (2013). “State of the art treatment of produced water”.
Water Treatment. DOI: 10.5772/53478

Igunnu, E. T., & Chen, G. Z. (2012). Produced water treatment technologies. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 9(3), 157–177. <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts049>

Jiménez, S; Micó, M; Medina, F; Arnaldos, M; and Contreras, S. (2018). “State of art of
produced water treatment”. *Chemosphere*, 192, 186-208.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653517317241> DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.139>

Kang, S., & Jeong, H. Y. (2015). Sorption of a nonionic surfactant Tween 80 by minerals and
soils. *Journal of Hazardous Materials*, 284, 143–150.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.11.010>

Khatib, Z., & Verbeek, P. (2002). Water to Value - Produced Water Management for Sustainable
Field Development of Mature and Green Fields. International Conference on Health, Safety
and Environment in Oil and Gas Exploration and Production.
<https://doi.org/10.2523/73853-ms>

- Klug, M. (2012). Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. *Revista de Química*, 26(1-2), 37-40.
- Kim, E.S; Lee, D.H; Yum, B.W; Chang, H.W. (2005). El efecto de la fuerza iónica y la dureza del agua en la remediación de la contaminación por percloroetileno mejorada con tensioactivos no iónicos, *J. Hazard. Mater.* 119. 195–203.
- Lee, W. H., and Reucroft, P. J., (1999). *Carbon* 37, 7
- León, A. Y., Contreras-Arenas, J. D., Garnica-Fuentes, C. F., Jiménez-Caballero, M. A., Pinto-Hernández, D. F., Ariza-León, E., Peña-Ballesteros, D. Y., & Molina-Velasco, D. R. (2023). Removal of organic compounds in wastewater using cocoa shell-based activated carbon–SiO₂ nanoparticles. *Environment, Development And Sustainability*.
<https://doi.org/10.1007/s10668-023-04168-y>
- León, A. Y., Rincón, J. R., Rodríguez, N., & Molina, D. R. (2021). Optimization of the preparation conditions for cocoa shell-based activated carbon and its evaluation as salts adsorbent material. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(8), 7777–7790. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03687-3>
- Luna, D., González, A., Gordon, M., & Martín, N. (2007). *Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco*.
- Luo, T; Abdu, S; and Wessling, M. (2018). “Selectivity of ion exchange membranes: A review”. *Journal of Membrane Science*, 555, 429–454. DOI: 10.1016/j.memsci.2018.03.051
- Luperón, L. M., Rodríguez, M. H., Hernández, J. F., & Otero-Calvis, A. (2020). Obtaining bioproducts by slow pyrolysis of coffee and cocoa husks as suitable candidates for being used as soil amendment and source of energy.
<https://www.redalyc.org/journal/3090/309063462004/html/>

Mansarovar Energy. (2018). Tratamiento aguas de formacion.

Massarweh, O., & Abushaikha, A. S. (2020). The use of surfactants in enhanced oil recovery: A review of recent advances. *Energy Reports*, 6, 3150-3178.

Méndez Díaz, J., Sánchez Polo, M., Rivera Utrilla, J., & Bautista Toledo, M. (2008). Eliminación del dodecilsulfonato sódico de las aguas mediante adsorción en carbones activados, ozonización catalizada y fotooxidación. Departamento de Química Inorgánica de la Facultad de Ciencias. Universidad de Granada. Avda. Fuentenueva S/N, 18071-Granada.

Mesa, S. L., Orjuela, J. M., Ortega, A. T., & Sandoval, J. A. (2018). Revisión del panorama actual del manejo de agua de producción en la industria petrolera colombiana Review of the current state of wastewater management in the Colombian oil industry. In *Gestión y Ambiente* (Vol. 21, Issue 1).

Morales, M. C., & Revelo, A. C. (2016). *DESEMPEÑO TÉCNICO Y AMBIENTAL DE LAS TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES Y MODERNAS DE TRATAMIENTO DE AGUA PRODUCIDA*.

Muddemann, T; Haupt, D; Sievers, M; and Kunz, U. (2019). “Electrochemical reactors for wastewater treatment”. *ChemBioEng Reviews*, 6(5), 142–156 DOI: 10.1002/cben.201900021

Nasiri, M; and Jafari, I; (2017). “Produced water from oil-gas plants: A short review on challenges and opportunities”. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 61(2). DOI: 10.3311/ppch.8786

- Nasiri, M; Jafari, I; and Parniankhoy, B. (2017). “Oil and gas produced water management: A review of treatment technologies, challenges, and opportunities”. *Chemical Engineering Communications*, 204(8), 990– 1005. DOI: 10.1080/00986445.2017.1330747
- Neff, J. (2002). “Produced water”. In *Bioaccumulation in marine organisms: Effect of contaminants from oil well produced water*. Elsevier, 1-35. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-043716-3.X5000-3>
- Niño, F., Gómez, J., (s.f.). Taller de pozos de inyección: generalidades sobre pozos disposal. [diapositivas de power point]. Disponible en: Ecopetrol; Equion, http://www.anh.gov.co/Seguridad-comunidadesy-medio-ambiente/Proyectos-de-Gestion-del-conocimiento/Taller%20Pozos%20de%20Inyeccion/Taller%20de%20pozos%20de%20inyecci%C3%B3n_Generalidades%20sobre%20pozos%20de%20disposici%C3%B3n_after%20JG1.pptx; consultado: octubre de 2017.
- Ndi Nsami, J; Ketcha; M.J. (2013). The Adsorption efficiency of chemically prepared activated carbon from cola nut shells by on methylene blue. *J Chem* 2013:1–7
- Oncel, M.S; Muhcu, A; Demirbas, E; and Kobya, M. (2013). “A comparative study of chemical precipitation and electrocoagulation for treatment of coal acid drainage wastewater”. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1(4), 989–995. DOI: 10.1016/j.jece.2013.08.008
- Ortega Ramírez, A. T., Fernanda Arcila, Y., & Vargas Díaz, L. M. (2019). *Review of the diagnosis of production water treatment in Colombian petroleum fields*. 19(2), 61–75. <https://doi.org/10.19053/1900771X.v19.n2.2019.12883>

Pankratz, T. (2000). "Evaporation: A wastewater treatment alternative: Wastewater Treatment".

Roads & Brigdes, December 28. Disponible en: [https://
www.roadsbridges.com/evaporation-wastewater-treatment-alt](https://www.roadsbridges.com/evaporation-wastewater-treatment-alt)

Pennell, K.D; Abriola, L.M; Weber Jr, W.J. (1993). Solubilización de dodecano residual mejorada con tensioactivos en columnas de suelo. 1. Investigación experimental, Medio Ambiente. Ciencia. Tecnología. 27. 2332–2340.

Pendleton, P., Wong, S. H., Schumann, R., Levay, G., Denoyel, R., and Rouquerol, J., (1997). Carbon 35, 1141.

Peña, J. R. (2023). Las 4 etapas en plantas de tratamiento de aguas residuales. Canal Gestión Integrada. <https://www.inesem.es/revistadigital/gestion-integrada/funcionamiento-planta-tratamiento-aguas/>

Petrocolombia. (2018). Proceso tratamiento de aguas de producción y caracterización fisicoquímica de aguas de producción.

Pinzón, M. L., & Cardona, A. M. (2010). Influencia del pH en la bioadsorción de CR(III) sobre cáscara de naranja: Determinación de las condiciones de operación en proceso discontinuo. Grupo de Investigación Recursos Naturales, Universidad de Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

Raja, P., & Barron, A. (2022). Análisis de área de superficie BET_nanopartículas. *LibreTexts*.

Renou, S; Givaudan, J.G; Poulain, S; Dirassouyan, F; and Moulin, P. (2008). "Landfill leachate treatment: Review and opportunity". Journal of Hazardous Materials, 150(3), 468–493. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.077 9

Reinoso, F. (2005). "Carbón activado: estructura, preparación y aplicaciones", Revista Uniandes, Colombia, 66–69.

Rincón, J. R. (2020). *Síntesis de carbón activado a partir de cáscara de cacao*.

Salahudeen, N; Ajinomoh, C.S; Nakakana; S. (2014). Adsorption Isotherm Study for Activated Carbon Produced from Cassava Peel. *J. Mater. Metallurg. Eng.* 4(3):8–12

Salamanca, E. (2016). “Tratamiento de aguas para el consumo humano”. *Módulo Arquitectura CUC*, 17(1), 29-48. DOI: <https://doi.org/10.17981/moducuc.17.1.2016.02>

Schwuger, M. J., & Smolka, I. G. (1977). Mixed adsorption of ionic and nonionic surfactants on active carbon. In *Colloid & Polymer Sci* (Vol. 255).

Shammas, N.K; Yang, J.Y; Yuan, P.C; and Hung, Y.T. (2005). “Chemical oxidation”. *Physicochemical Treatment Processes*, 229–270. DOI: 10.1385/1-59259-820-x:229

Shokrollahzadeh, S; Golmohammad, F; Naseri, N; Shokouhi, H; and Arman-Mehr, M. (2012). “Chemical oxidation for removal of hydrocarbons from gas-field produced water”. *Procedia Engineering*, 42, 942-947. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.487>

Stevenson, P., Shaw, R., Tulloch, J., & Evans, G. M. (2011). *The Influence of Stirring upon the Adsorption of a Cationic Surfactant onto Activated Carbon Particles*.

U. Sevilla. (2011). *Manual del Carbón Activado*. www.aguapedia.net

Velázquez, L. (2014). Adsorption of inorganic priority pollutants in water by tailored lignocellulosic and carbonaceous adsorbents. Tesis del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, SLP. México.

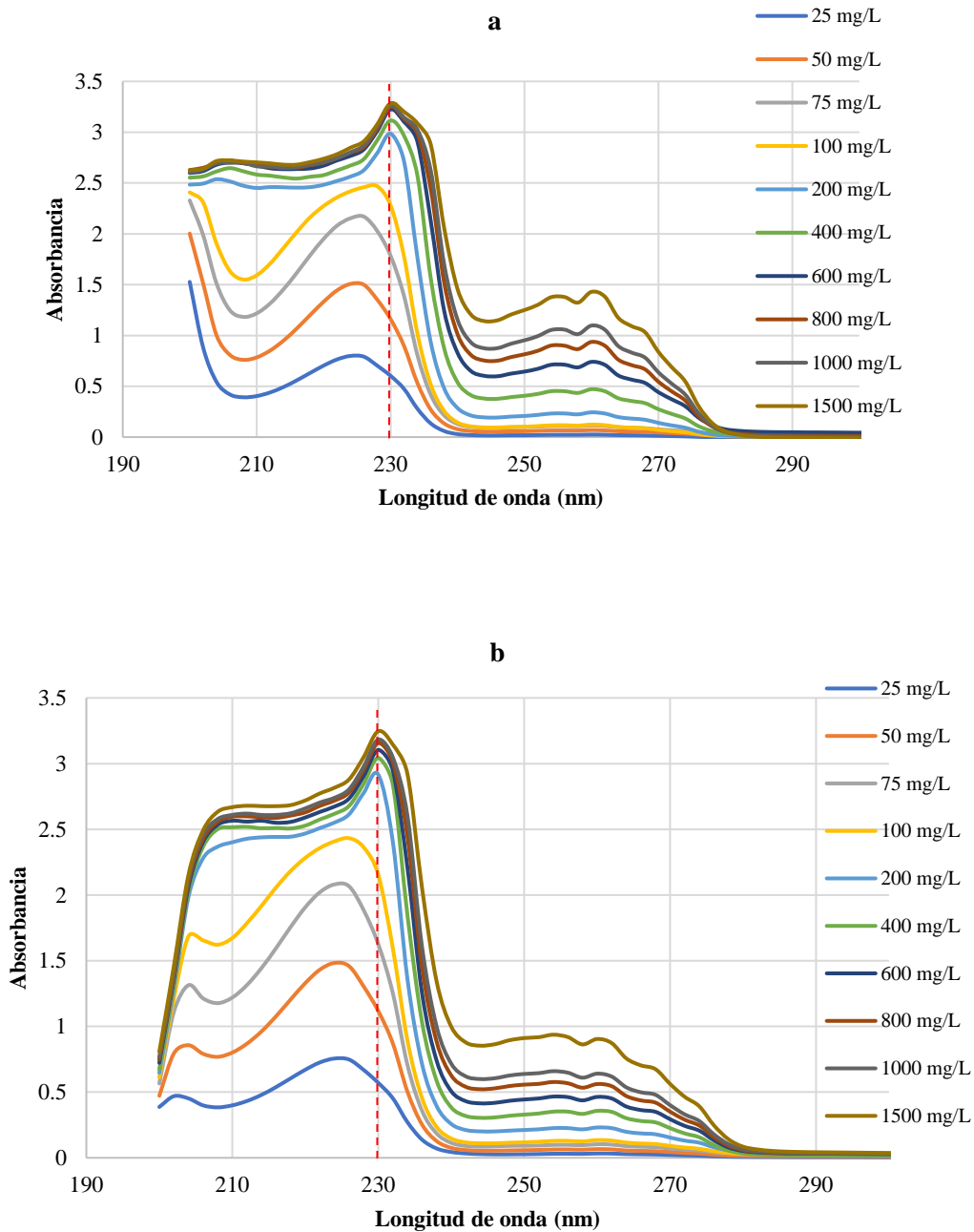
Vicuña, E; Ara, S; y Loayza, J. (s.f.). “Sistemas híbridos de tratamiento de aguas residuales”. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*.

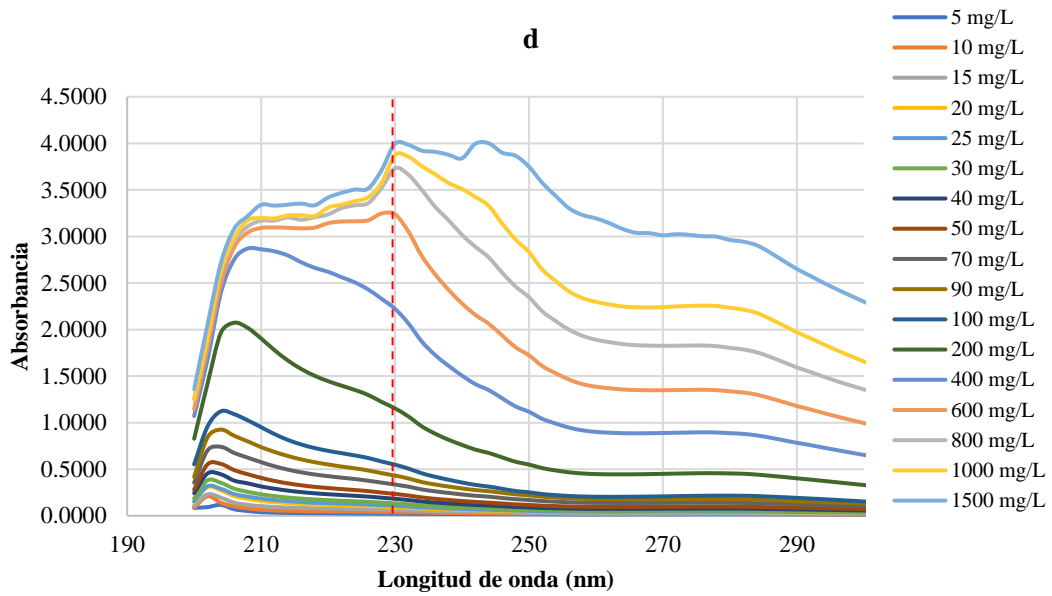
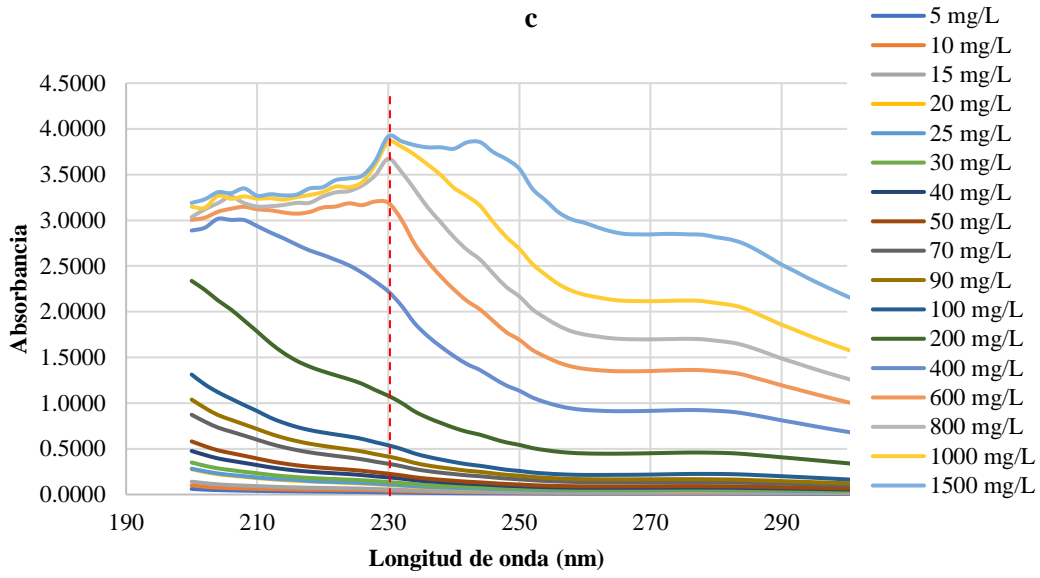
Villegas, J., Arcila, N., Ortega, D., Franco, C., Cortés, F., (2017). Remoción de hidrocarburos de aguas de producción de la industria petrolera utilizando na-nointermedios compuestos por SiO₂ funcionalizados con nanopartículas magnéticas. *Dyna* 84, 65-74.

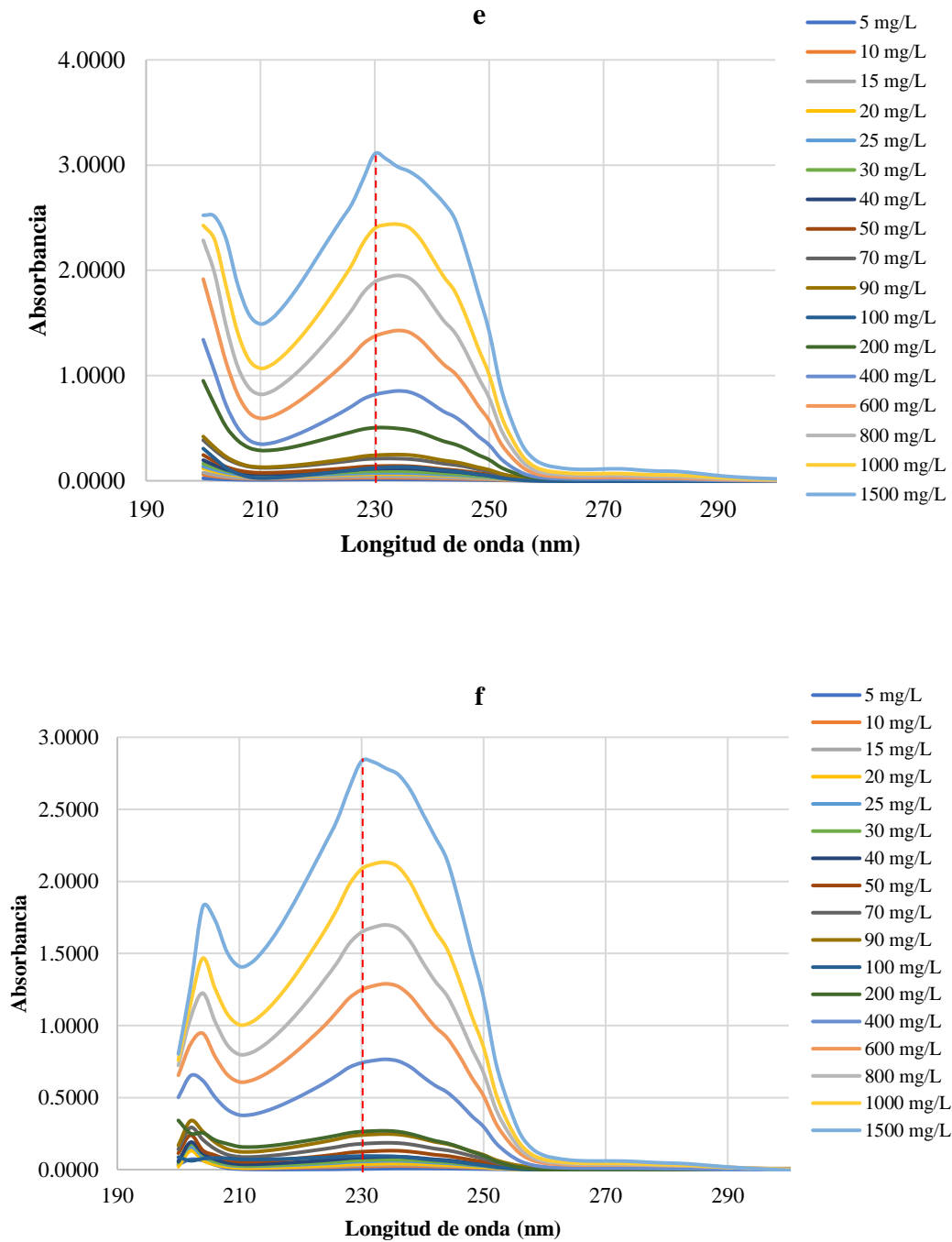
- Wahid, F; Mohammadzai, I.U; Khan, A; Shah, Z; Hassan, W; Ali, N. (2017). Removal of toxic metals with activated carbon prepared from *Salvadora persica*. *Arab J Chem* 10:S2205–S2212
- Worch, E. (2012). “Adsorption technology in water treatment: Fundamentals, processes and modeling.” Walter de Gruyter. DOI: <https://doi.org/10.1515/9783110240238>
- Xiao, J. X., Zhang, Y., Wang, C., Zhang, J., Wang, C. M., Bao, Y. X., & Zhao, Z. G. (2005). Adsorption of cationic-anionic surfactant mixtures on activated carbon. *Carbon*, 43(5), 1032–1038. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.11.039>
- Xu, T; and Huang, C. (2008). “Electrodialysis-based separation technologies: A critical review”. *AIChE Journal*, 54(12), 3147–3159. DOI: 10.1002/aic.11643
- Yang, R.T. (2003). *Adsorbents: Fundamentals and Applications*. Wiley – Interscience Publication.
- Yang, G.P; Chen, Q; Li, X.X; Cao, X.Y. (2010). Estudio sobre los comportamientos de sorción de Tween-80 en sedimentos marinos, *Chemosphere* 79. 1019–1025.
- Yalçın. M., Gürses, A., Do ar, Ç. and Sözbílir, M. (2004). *Adsorption* 10, 339.
- Zhang, X., Wang, X., Su, J., Wang, X., Jiang, L., Wu, H., & Wu, C. (2012). The effects of surfactant template concentration on the supercapacitive behaviors of hierarchically porous carbons. *Journal of Power Sources*, 199, 402–408. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.10.070>

8. Apéndices

Apéndice A. Curvas espectro UV-VIS para diferentes concentraciones de surfactantes







Nota. Las curvas de lectura UV-VIS se realizaron para cada surfactante con salinidad (CS) y sin salinidad (SS) y están mostradas así: (a) SDBS SS, (b) SDBS CS, (c) Redicote SS, (d) Redicote CS, (e) Tween-80 SS y (f) Tween 80 CS.