

Evaluación de la remoción de sales orgánicas e inorgánicas en aguas contaminadas usando carbones activados obtenidos a partir de biomasa residual vegetal del departamento de Santander.

Erika Natalia Rivera Arias y Bryan David Estévez Barrios

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero de Petróleos

Director

Adán Yovani León Bermúdez

Ph.D. en Ingeniería Química

Codirector

Emiliano Ariza León

Ph.D. en Ingeniería Química

Daniel Ricardo Molina

Ph.D. en Química

Sergio Castellanos

Ingeniero Químico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2025

### **Dedicatoria**

*A mi madre Gilma, por ser la persona que siempre estuvo ahí apoyándome pese a las dificultades, por creer en mis capacidades y darme su amor incondicional, por ser la fuente de inspiración para lograr mis objetivos y forjarme como la persona que soy hoy. Sin tu sacrificio no lo hubiera logrado. Te quiero mucho.*

*A mi padre Álvaro y hermana Karen Tatiana, que siempre me dan sus consejos para mejorar como persona y estar dispuestos cuando los necesitaba.*

*A mi padrastro Reinaldo, por ser mi segundo padre y criarme, gracias a tu ayuda puedo culminar mi carrera. Fuiste un eje fundamental en este logro.*

*A mi compañera Erika Natalia, gracias por escogerme como compañero de este proyecto y su dedicación para el culmino de este.*

***Bryan David Estevez Barrios***

### **Dedicatoria**

*A Dios, quien me brindó la paciencia y la perseverancia necesarias para culminar este camino, su compañía fue mi fortaleza en cada logro.*

*A mis padres, Flor y Antonio, por su amor incondicional, su apoyo y su fe. Por creer en mí incluso cuando yo dudaba. Su dedicación y sacrificio hicieron posible este sueño. A mi hermano, por ser una fuente de inspiración y alegría en cada paso de mi vida.*

*A toda mi familia y amigos, es un sueño del que todos ustedes hacen parte. Gracias por permanecer a mi lado, por guiarme y, sobre todo, por motivarme día a día para seguir.*

*A mis tres ángeles, su paso por mi vida significó muchas veces la fuerza para no rendirme, su recuerdo vive en cada logro.*

**Erika Natalia Rivera Arias.**

### **Agradecimientos**

Queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos a todas las personas que contribuyeron en la realización de este trabajo y nos acompañaron durante esta etapa.

Al profesor Adán León, nuestro director de proyecto de grado, por su paciencia, dedicación, su acompañamiento y el tiempo que dedicó a nuestro trabajo. Gracias por confiar en nosotros.

A Andrey y Sergio, apreciamos el tiempo que se tomaron para resolver nuestras dudas y darnos su consejo para desarrollar el proyecto de la mejor manera. La atención brindada, los comentarios y sugerencias realizadas hicieron que esto fuera posible.

A la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería de Petróleos, por permitirnos ser parte de esta prestigiosa institución, por las experiencias enriquecedoras y la formación profesional recibida.

Al apoyo técnico y profesional brindado por la Universidad Industrial de Santander (UIS) en el marco de los proyectos de Investigación internos con números 3914 y 4110.

*Bryan y Erika.*

**Tabla de Contenido**

Introducción .....	16
1. Generalidades.....	18
1.1. Planteamiento del problema.....	18
2. Objetivos .....	20
2.1 Objetivo General .....	20
2.2 Objetivos Específicos.....	20
3. Fundamentos teóricos y estado del arte .....	21
3.1 Producción de agua en la industria del petróleo .....	21
3.2 Producción de agua en la industria de los hidrocarburos en Colombia. ....	22
3.3 Agua de producción .....	25
3.4 Características y contaminantes del agua producida por la industria del petróleo .....	26
3.4.1 Hidrocarburos .....	28
3.4.2 Metales pesados .....	30
3.4.3 Carbono orgánico total.....	31
3.4.4 Químicos de producción .....	32
3.4.5 Salinidad .....	33
3.5 Sales orgánicas e inorgánicas.....	38
3.5.1 Sales Orgánicas .....	39
3.5.2 Sales Inorgánicas .....	39
3.6 Uso y disposición del agua resultante en actividades de la industria del petróleo .....	41

3.7 Disposición, normas y objetivos de manejo del agua de la industria del petróleo en Colombia .....	44
3.7.1 Reúso.....	48
3.7.2 Reutilización .....	49
3.8 Tratamiento del agua producida por la industria petrolera .....	50
3.8.1 Métodos de tratamiento físicos .....	53
3.8.2 Métodos de tratamiento químicos.....	55
3.9 Adsorción.....	59
3.9.1 Modelo de Langmuir.....	60
3.9.2 Modelo de Freundlich .....	61
3.9.3 Modelo de Temkin.....	62
3.10 Materiales adsorbentes usados en el tratamiento de aguas contaminadas .....	63
3.11 Carbón Activado .....	65
3.11.1 Activación del carbón .....	67
3.11.2 Pirolisis .....	68
3.12 Biomasa Residual.....	69
3.13 Transición energética y economía circular .....	72
4. Metodología .....	74
4.1 Materiales y métodos .....	74
4.1.1 Reactivos y equipos de laboratorio .....	74
4.2 Procedimiento experimental .....	75
4.2.1 Selección y preparación de la biomasa .....	77
4.2.2 Análisis Termogravimétrico .....	77

4.2.3 Activación del carbón .....	78
4.2.4 Caracterización del carbón.....	79
4.2.5 Preparación de las disoluciones .....	80
4.2.6 Determinación de la adsorción del carbón activado mediante análisis por espectroscopia UV-Vis.....	80
5. Análisis de resultados .....	83
5.1 Análisis termogravimétrico de la biomasa.....	83
5.2 Rendimiento del proceso de pirolisis .....	87
5.3 Caracterización de los carbones activados.....	88
5.3.1 Análisis del área superficial específica BET .....	88
5.3.2 Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier FTIR.....	91
5.4 Determinación de la adsorción de carbón activado por espectroscopia UV-Vis.....	94
5.4.1 Ajuste de las curvas de calibración .....	94
5.4.2 Análisis de adsorción de azul de metileno.....	96
5.4.3 Análisis de adsorción de dicromato de potasio.....	101
5.4.4 Análisis de adsorción de sulfato de plata.....	106
6. Discusión de resultados.....	112
7. Conclusiones .....	115
8. Recomendaciones .....	117
Referencias Bibliográficas .....	118

**Lista de Tablas**

Tabla 1	<i>Volumen de agua por zona de extracción</i> .....	23
Tabla 2	<i>Propiedades fisicoquímicas y componentes del agua de producción</i> .....	27
Tabla 3	<i>Hidrocarburos presentes en aguas de producción</i> .....	29
Tabla 4	<i>Metales pesados presentes en el agua de producción</i> . ....	31
Tabla 5	<i>Químicos presentes en el agua de producción</i> . ....	32
Tabla 6	<i>Clasificación del agua de producción según su concentración de cloruro de sodio</i> . ....	35
Tabla 7	<i>Concentraciones de iones inorgánicos en aguas de producción</i> .....	36
Tabla 8	<i>Líneas estratégicas “Agua neutralidad”</i> .....	46
Tabla 9	<i>Clasificación tratamiento de aguas de producción</i> . ....	52
Tabla 10	<i>Métodos físicos para el tratamiento de agua</i> .....	54
Tabla 11	<i>Métodos químicos para el tratamiento de agua</i> .....	56
Tabla 12	<i>Materiales adsorbentes</i> .....	63
Tabla 13	<i>Clasificación IUPAC según tamaño de poro</i> .....	66
Tabla 14	<i>Reactivos y materiales usados en la investigación</i> . ....	74
Tabla 15	<i>Equipos usados para el desarrollo de la investigación</i> . ....	75
Tabla 16	<i>Rendimiento del proceso de pirolisis para cada biomasa</i> .....	88
Tabla 17	<i>Análisis BET de los carbones activados</i> .....	89
Tabla 18	<i>Concentración inicial y final de azul de metileno para cáscara de cacao</i> .....	96
Tabla 19	<i>Concentración inicial y final de azul de metileno para bagazo de caña</i> .....	97

Tabla 20	<i>Concentración inicial y final de azul de metileno para cuesco de palma. ....</i>	97
Tabla 21	<i>Coeficiente de correlación R2 para los tres modelos matemáticos empleados para el azul de metileno .....</i>	99
Tabla 22	<i>Parámetros de las isothermas de Freundlich en la adsorción de azul de metileno .....</i>	101
Tabla 23	<i>Concentración inicial y final de dicromato de potasio para cáscara de cacao .....</i>	102
Tabla 24	<i>Concentración inicial y final de dicromato de potasio para bagazo de caña .....</i>	102
Tabla 25	<i>Concentración inicial y final de dicromato de potasio para cuesco de palma .....</i>	102
Tabla 26	<i>Coeficiente de correlación R2 para los tres modelos matemáticos empleados para el dicromato de potasio.....</i>	104
Tabla 27	<i>Parámetros de las isothermas de Freundlich en la adsorción de dicromato de potasio .....</i>	106
Tabla 28	<i>Concentración inicial y final de sulfato de plata para cáscara de cacao .....</i>	107
Tabla 29	<i>Concentración inicial y final de sulfato de plata para bagazo de caña .....</i>	107
Tabla 30	<i>Concentración inicial y final de sulfato de plata para cuesco de palma .....</i>	107
Tabla 31	<i>Coeficiente de correlación R2 para los tres modelos matemáticos empleados para el sulfato de plata.....</i>	109
Tabla 32	<i>Parámetros de las isothermas de Freundlich en la adsorción de sulfato de plata .....</i>	111

**Lista de Figuras**

Figura 1 <i>Agua requerida para operar, captación y reutilización.</i> .....	44
Figura 2 <i>Alternativas de uso y disposición de efluentes en Ecopetrol.</i> .....	45
Figura 3 <i>Reúso y reutilización de las aguas de producción en la industria colombiana.</i> .....	48
Figura 4 <i>Reutilización del agua en Colombia.</i> .....	50
Figura 5 <i>Diagrama de flujo experimenta del proyecto</i> .....	76
Figura 6 <i>Diagrama de flujo del proceso de activación del carbón</i> .....	78
Figura 7 <i>TGA de la cáscara de cacao.</i> .....	84
Figura 8 <i>TGA del bagazo de caña.</i> .....	85
Figura 9 <i>TGA del cuesco de palma</i> .....	86
Figura 10 <i>Curvas de adsorción/desorción de N<sub>2</sub> de los carbones activados. (a) C.A cáscara de cacao, (b) C.A. bagazo de caña y (c) C.A. cuesco de palma.</i> .....	90
Figura 11 <i>Retorno Tipos de isoterma de adsorción según la IUPAC</i> .....	91
Figura 12 <i>Espectros FTIR Absorbancia vs Longitud de onda (a) Biomasa y C.A. de cáscara de caco, (b) Biomasa y C.A. de bagazo de caña y (c) Biomasa y C.A. de cuesco de palma.</i> .....	92
Figura 13 <i>Curvas de calibración de las disoluciones de sales</i> .....	94
Figura 14 <i>Porcentaje de remoción vs concentración de azul de metileno para los diferentes carbones</i> .....	98
Figura 15 <i>Isotermas de adsorción de azul de metileno según el modelo matemático de Freundlich. (a) C.A. de cáscara de caco, (b) C.A. de bagazo de caña y (c) C.A. de cuesco de palma.</i> .....	99

Figura 16 <i>Porcentaje de remoción vs concentración de dicromato de potasio para diferentes carbones</i> .....	103
Figura 17 <i>Isotermas de adsorción de dicromato de potasio según el modelo matemático de Freundlich. (a) C.A. de cáscara de cacao, (b) C.A. de bagazo de caña y (c) C.A. de cuesco de palma</i> .....	105
Figura 18 <i>Porcentaje de remoción vs concentración de sulfato de plata para diferentes carbones</i> .....	108
Figura 19 <i>Isotermas de adsorción de sulfato de plata según el modelo matemático de Freundlich. (a) C.A. de cáscara de cacao, (b) C.A. de bagazo de caña y (c) C.A. de cuesco de palma</i> .....	109

**Lista de Apéndices**

Apéndice A Curvas espectro UV-VIS para diferentes concentraciones de sales ..... 122

## Glosario

**Adsorción:** proceso mediante el cual se atrapan o retienen átomos, moléculas o iones mediante el contacto y la adhesión a la superficie de un material. En resumen, se trata de la acumulación de una sustancia (adsorbato) en una determinada superficie interfacial (adsorbente).

**Biomasa:** residuos y desechos de plantas y animales, usados para la generación de energía.

Incluye productos, subproductos y residuos forestales, agrícolas y de industrias relacionadas.

**Eficiencia:** capacidad de un proceso o insumo para lograr con su objetivo de la mejor manera posible.

**Sal:** compuesto químico de estructura cristalina, resultado de un enlace iónico entre un anión y un catión. Se forman como producto de una reacción química de neutralización entre un ácido y una base.

## Resumen

**Título:** Evaluación de la remoción de sales orgánicas e inorgánicas en aguas contaminadas usando carbones activados obtenidos a partir de biomasa residual vegetal del departamento de Santander.<sup>1\*</sup>

**Autor:** Erika Natalia Rivera Arias, Bryan David Estévez Barrios<sup>2\*3\*</sup>

**Palabras Clave:** Remoción de sales, adsorción, carbón activado.

**Descripción:** La industria de los hidrocarburos produce un volumen cercano a los 300 millones de barriles de agua diarios a nivel mundial, cantidad que incrementa a medida que los campos declinan y nuevos procesos para mejorar la producción y el mantenimiento de los pozos son usados. Sin embargo, y a pesar de la implementación de mecanismos y el uso de herramientas para reducir la entrada de agua en los pozos, el volumen que llega a superficie es muy alto, lo que hace necesaria y casi obligatoria la búsqueda de nuevas y mejores alternativas para tratar y reusar estas aguas.

Se trata de agua mezclada con contaminantes que suben a superficie junto al hidrocarburo extraído de yacimiento, y a los cuales se les debe prestar especial atención, debido a problemas que pueden generar en tuberías, problemas ambientales y normatividad de cada región para su uso en distintas actividades. Este trabajo evalúa el proceso de remoción de sales orgánicas e inorgánicas usando como compuestos modelo el azul de metileno, dicromato de potasio y sulfato de plata en aguas sintéticas para representar las condiciones de las aguas de la industria del petróleo, a partir de carbones activados. Estos materiales se obtuvieron a partir de biomasa residual vegetal representativa de Santander previamente seleccionada como cuesco de palma, cáscara de cacao y bagazo de caña. La síntesis de los carbones activados se realizó por activación química con  $H_3PO_4$  y el proceso de pirólisis a 430 °C.

El carbón activado de cuesco de palma presentó mayor eficiencia sobre remoción de azul de metileno, dicromato de potasio y sulfato de plata con valores promedio de 99.6%, 92.6 % y 57.7 %, respectivamente. Adicionalmente, la cinética de adsorción se validó con el modelo de Freundlich. Finalmente, a partir de los resultados se puede indicar que los carbones activados obtenidos a partir de biomasa residual proveniente de procesos agroindustriales, se pueden considerar como una herramienta de gran interés en la remoción de sales en aguas contaminadas.

---

<sup>1\*</sup> Trabajo de Grado

<sup>2\*3\*</sup> Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Programa académico. Director: Adán Yovani León Bermúdez. Doctor en Ingeniería Química. Codirector: Emiliano Ariza León. Doctor en Ingeniería Química. Daniel Ricardo Molina. Doctor en Química. Sergio Castellanos. Ingeniero Químico.

### Abstract

**Title:** Evaluation of the removal of organic and inorganic salts in contaminated waters using activated carbons obtained from residual plant biomass from the department of Santander.\*

**Author(s):** Erika Natalia Rivera Arias, Brayan David Estévez Barrios<sup>5\*\*</sup>

**Key Words:** Salt removal, Adsorption, Activated Carbon.

**Description:** The hydrocarbon industry produces close to 300 million barrels of water per day worldwide, an amount that increases as fields decline and new processes to improve production and well maintenance are used. However, despite the implementation of mechanisms and the use of tools to reduce the water entering the wells, the volume that reaches the surface is very high, which makes it necessary and almost mandatory to search for new and better alternatives to treat and reuse this water.

It is water mixed with contaminants that rise to the surface together with the hydrocarbon extracted from the reservoir, and to which special attention must be paid, due to problems that can generate in pipelines, environmental problems and regulations of each region for its use in different activities. This work evaluates the removal process of organic and inorganic salts using methylene blue, potassium dichromate and silver sulfate as model compounds in synthetic waters to represent the conditions of the waters of the oil industry, from activated carbons. These materials were obtained from residual vegetable biomass representative of Santander, previously selected as palm bark, cocoa husk and sugarcane bagasse. The synthesis of the activated carbons was carried out by chemical activation with H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> and pyrolysis process at 430 °C.

The activated carbon from palm hulls presented the highest removal efficiency of methylene blue, potassium dichromate and silver sulfate with average values of 99.6%, 92.6% and 57.7%, respectively. Finally, from the results it can be indicated that activated carbons obtained from residual biomass from agroindustrial processes can be considered as a tool of great interest in the removal of salts in contaminated water.

---

<sup>4\*</sup> Degree Work

<sup>5\*\*</sup> Physical – Chemical Engineering Faculty. Petroleum Engineering School. Director: Adan Yovani León Bermúdez Ph. D. Chemical Engineering. Co-Director: Emiliano Ariza León Ph. D. Chemical Engineering. Daniel Ricardo Molina Velazco Ph. D. Chemical. Sergio Castellanos Chemical Engineering.

## Introducción

El apresurado y constante crecimiento de la demanda energética mundial ha ocasionado que los recursos convencionales de hidrocarburos no sean suficientes, sumado a las grandes consecuencias del calentamiento global y a los anuncios constantes sobre el cese de actividades de exploración y explotación de hidrocarburos, han significado una acelerada búsqueda de una transición tanto energética como financiera hacia un futuro que mire más allá del petróleo, esto ha obligado a la industria energética a incursionar en la búsqueda e implementación de diferentes tipos de energías renovables, sin embargo, el proceso de cambio hacia estas energías es complejo y requiere de una serie de avances fundamentales, sin los cuales no sería posible ni siquiera hablar de dejar de depender de la industria petrolera como fuente energética principal, dichos avances conllevan un proceso lento y se enfrentan a problemas de sostenibilidad, eficiencia y almacenamiento. Esto demuestra que los hidrocarburos seguirán liderando en las próximas décadas la industria energética mundial, pero trabajando de la mano con las nuevas energías renovables.

En el camino hacia la transición energética, la industria tiene la responsabilidad de buscar la manera de tratar y aprovechar la mayoría de sus procesos más tradicionales. El agua es uno de los aspectos más importantes y con mayor relevancia en el cuidado del medio ambiente, el objetivo es lograr que el agua usada y producida por la industria se trate y se reutilice. La industria de los hidrocarburos consume recursos hídricos y energéticos, generando agua con diversidad de residuos peligrosos, su correcto manejo y disposición es un aspecto importante y que no se debe pasar por alto.

Actualmente la industria genera un gran volumen de agua, que aumenta a medida que los campos de petróleo requieren una mayor intervención para la producción del hidrocarburo, uno de los principales objetivos hoy en día es la reducción de la demanda hídrica, lo que implica plantear el reúso del agua como una práctica obligada de cara al ahorro de recursos y materias primas y a la sostenibilidad económica y medioambiental de la industria Oil & Gas.

El agua que se produce es un subproducto que sale a la superficie durante la exploración y producción de petróleo y gas, en algunas operaciones, el agua producida resulta de la inyección de agua limpia en los depósitos de petróleo para reforzar la producción de los pozos, durante este proceso, el fluido interactúa con la formación geológica, el agua y los hidrocarburos, y una fracción del fluido resultante regresa a la superficie. El agua de formación en los campos suele ser muy salina, por lo cual, se proporciona un mecanismo para entregar salmuera de petróleo a la superficie y, por lo tanto, brinda una oportunidad para la recuperación de sales.

Esta investigación se enfoca en evaluar experimentalmente el proceso de recuperación de sales orgánicas e inorgánicas a escala de laboratorio mediante el uso de carbones activados obtenidos a partir de biomasa residual vegetal de cacao, caña y palma, como parte del proceso de tratamiento y reutilización de las aguas producidas en los campos petroleros, estableciendo la capacidad de adsorción de los carbones activados en soluciones preparadas con sales de Cromo, Plata y azul de metileno, el proceso se efectuó mediante la técnica UVVIS e isothermas de adsorción.

Con los resultados se realiza un análisis de la capacidad de adsorción del carbón activado que evalúa la efectividad del proceso y obtiene una relación de la composición del agua de producción con la capacidad de adsorción del carbón activado y la cantidad de sales recuperada.

## 1. Generalidades

### 1.1. Planteamiento del problema

La generación de grandes cantidades de aguas residuales y las escasas posibilidades de tratamiento y reutilización, representan uno de los mayores problemas a los que se enfrenta el mundo en la actualidad, este problema afecta a distintos sectores industriales, incluido el sector de los hidrocarburos, que produce más de 250 millones de barriles de agua al año en el mundo (Sher et al., 2023). El agua se encuentra presente durante toda la vida productiva de un pozo y por ello es importante identificar si el volumen de agua producida afecta la viabilidad financiera del proyecto de extracción del hidrocarburo. (Ortega, A.T., Marín, D.F., y Rodríguez, E.D., 2019). El tratamiento de agua implica altos costos y la aplicación de una gran variedad de procesos, con los cuales no se garantiza la entrega de un agua totalmente limpia, sobre todo cuando se trata de aguas altamente contaminadas, en especial con compuestos orgánicos e inorgánicos disueltos, metales pesados y/o productos químicos dañinos para el medio ambiente y la integridad de las personas.

La remoción de sólidos, partículas y sustancias solubles puede realizarse por precipitación, intercambio iónico, filtración por membrana, destrucción electroquímica, ozonización, entre otros. (León, A.Y., Rincón, J.R., Rodríguez, N. et al., 2022). Sin embargo, los métodos de adsorción han generado una creciente atención en la remoción de contaminantes en aguas, especialmente usando carbones activados como material adsorbente, los cuales han demostrado su alta eficiencia, bajo costo e importancia en la tan buscada, transformación energética.

El uso de la biomasa, en especial aquella obtenida a partir de residuos de procesos agroindustriales, ha tomado significativa relevancia, especialmente por tratarse de residuos renovables, resultado de procesos con poca atención ambiental y que generan residuos con un potencial enorme, no solamente para la producción de energía, sino también como materia prima para la producción de diversos productos químicos con gran valor comercial y que representan un punto clave en el desarrollo sostenible que busca el mundo actual.

El uso de carbón activado sintetizado a partir de biomasa residual proveniente de procesos agroindustriales en métodos de adsorción ha mostrado resultados altamente favorables, proyectándose como una solución a problemáticas de acumulación y mala disposición de residuos agroindustriales, creación de materiales con alta capacidad de adsorción y tratamiento de aguas contaminadas de la industria, brindando así un enfoque favorable en el desarrollo de un esquema económico y ambiental basado en una economía sostenible que centrará su estudio en el departamento de Santander y representará una solución amigable con la industria, el sector campesino y el medio ambiente.

#### Pregunta de investigación

A partir del planteamiento del problema, análisis del mismo e investigación, se genera la siguiente pregunta, a partir de la cual se establece lo que se quiere abordar, el contexto en el que se realiza el proyecto y la correcta planeación de la estrategia experimental:

¿Cuál es la eficacia de los carbones activados obtenidos a partir de biomasa residual vegetal del departamento de Santander como materiales adsorbentes para la remoción de sales orgánicas e inorgánicas en aguas contaminadas resultantes de actividades en la industria petrolera?

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Evaluar el proceso de remoción de sales orgánicas e inorgánicas en aguas contaminadas usando carbones activados elaborados a partir de biomasa residual vegetal del departamento de Santander.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Determinar el proceso y las condiciones de adsorción de sales orgánicas e inorgánicas en carbones activados mediante revisión bibliográfica.

Preparar carbones activados a partir de biomasa residual vegetal del departamento de Santander para la remoción de sales orgánicas e inorgánicas en aguas contaminadas.

Evaluar la capacidad de adsorción de los carbones activados sobre la remoción de sales orgánicas e inorgánicas en aguas contaminadas, usando espectroscopia UV-VIS y modelos de isothermas de adsorción.

### 3. Fundamentos teóricos y estado del arte

#### 3.1 Producción de agua en la industria del petróleo

Dentro de los procesos de explotación y desarrollo de la industria del petróleo, la producción de agua se debe considerar de la misma manera que la producción de crudo. Al tratarse de un sistema de flujo trifásico, donde fluye gas, petróleo y agua (Pérez, Santos Santos, y Rojas, 2010), los volúmenes de agua obtenidos en cada pozo se convierten en factores principales que determinan la viabilidad técnica, económica y ambiental de cada proyecto.

De acuerdo a la cantidad, la producción de agua se puede dividir en 2 tipos: El agua buena que hace referencia a aquella que se produce por debajo del límite económico de la “Water-Oil Ratio” (Rodríguez González, Cabrera Pilco, y Condo Ramos, 2014). Y el agua mala, que es aquella que se produce sobre el límite económico dado por el Water-Oil Ratio (WOR), por lo cual, la producción de petróleo es tan baja con respecto a la producción de agua que no es económicamente rentable para compensar costos de tratamiento en superficie (Baily, y otros, 2000).

El sector petrolero emplea y produce altas cantidades de agua, generando en promedio de tres a cinco barriles de agua por cada barril de petróleo; sin embargo, en pozos que han llegado a su etapa de madures, esta cifra puede llegar a aumentar hasta alcanzar una producción de entre diez y catorce barriles de agua (Ortega Ramírez, A.T, Arcila, Y.F. y Vargas Díaz, L.M, 2020).

Por otra parte, la relación agua-petróleo (RAP), correspondiente a los barriles de agua generados por cada barril de crudo producido, varía a nivel mundial entre 3 y 5, llegando a valores entre 10 y 14 para campos maduros. (Cepeda P. & Martínez L., 2017)

Según Kassab et al. (2021) la principal fuente de generación de residuos en la producción de petróleo y gas se concentra en las aguas de producción, y su tratamiento y disposición ha representado grandes inversiones y diversidad de problemas. La búsqueda y aplicación de nuevas metodologías de control y técnicas de tratamiento han logrado la disminución de hasta un 89% del agua producida en diversas actividades de la industria, consiguiendo también disminuir el envejecimiento de los campos (Bailey et al. 2000).

A pesar de las diversas estrategias aplicadas para un correcto tratamiento, reúso y disposición final de las aguas de producción, no se ha logrado establecer una solución efectiva al cien por ciento y que represente un impacto significativo en las implicaciones ambientales, sociales y económicas que estas representan.

### **3.2 Producción de agua en la industria de los hidrocarburos en Colombia.**

La relación de la producción de agua en Colombia con respecto a la producción de petróleo en 2023 fue en promedio de 13.8 Bbl agua por cada Bbl de crudo, respecto a 13.2 en 2022 (Ecopetrol 2023). Lo que evidencia que en el país la producción de agua es bastante elevada con respecto a la cantidad de petróleo extraído, situación que representa una problemática que afecta de manera directa y negativa la rentabilidad de los proyectos en la industria, por los altos costos de tratamiento que implica. En lo referente al agua de producción, se produjo un aumento del 7.3% en comparación al año anterior debido a la mayor capacidad de tratamiento y manejo de agua que tuvieron los campos Rubiales, Caño Sur y Castilla.

El agua es usada en su mayoría en actividades referentes a refinación, correspondiente a un 74,9% del total, y en actividades de producción un 24,9%, el restante es usado en áreas administrativas y el instituto colombiano del petróleo (ICP). El 62% del total de agua fresca

captada correspondió a fuentes superficiales, 18% a subterráneas y 20% a acueductos y proveedores externos (Ecopetrol 2023). En la tabla 1 se muestran las cifras de agua extraída por cada zona.

**Tabla 1**

*Volumen de agua por zona de extracción*

<b>Extracción de agua</b> <b>(Millones de m<sup>3</sup>)</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>2023</b>
Agua superficial	34,493	26,023	23,134	25,580
Agua subterránea	9,397	8,691	7,221	7,277
Agua de origen marino	0	10	0	0
Acueductos	7,381	6,997	7,751	8,407
Agua de producción	403,595	388,117	430,551	461,942
<b>Total extracción de agua</b>	<b>454,866</b>	<b>429,838</b>	<b>468,657</b>	<b>503,206</b>

*Nota.* La tabla muestra el volumen de agua extraído en los últimos 4 años en Colombia y su zona de extracción correspondiente. Tomado de Ecopetrol. Reporte Integrado de Gestión Sostenible 2023.

Ecopetrol reveló que para el 2023, el volumen total de agua que se necesitó para desarrollar las diversas actividades establecidas en sus procesos alcanzó los 194,1 millones de metros cúbicos. De esta cifra, 152,8 millones de metros cúbicos, equivalente a un 79 %, provienen de la reutilización de efluentes, y solo 41,3 millones de metros cúbicos equivalente al 26 %, fue captado de fuentes naturales y/o comprado a acueductos. (Ecopetrol, 2024).

Según BNamericas, la mayor producción de agua en Colombia se concentra en los campos Rubiales y Castilla. En Rubiales se estimó una producción de 3 millones BWPD (barriles de agua por día) y para el campo Castilla se alcanzó una producción de más de 1 millón de BWPD en 2019.

El consumo de agua es mayor cuando la producción de hidrocarburos implica el uso de métodos como la inyección, que, según Ecopetrol, es el más utilizado en Colombia. (Ecopetrol, 2014). Las aguas de producción pueden pasar por un proceso de tratamiento y lograr ser reinyectadas en la misma formación, esto con el fin de mantener la presión de los yacimientos y por ende aumentar el factor de recobro; ser tratadas y vertidas a cuerpos de aguas superficiales o al suelo, o ser reinyectadas en los yacimientos, como estrategia de disposición final. (Almansa-Manrique et al., 2018, p. 2)

Un referente de la producción de agua en la industria de los hidrocarburos en Colombia son las cifras tomadas del campo Castilla, en el cual el agua de producción alcanza los cuatro millones de barriles respecto a una producción de más o menos 170 mil barriles de crudo (Villegas et al., 2017). Según Ecopetrol el agua de producción en 2020 alcanzó los 403,4 millones de metros cúbicos, lo cual significó un aumento del 64,85% en comparación con los 244,7 millones de metros cúbicos producidos en 2016. (Ecopetrol, 2021).

Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), la industria petrolera usa 0,35 por ciento del agua que se consume en el país. (Portafolio, 2014) Según datos brindados por el Ministerio de Minas y Energía en el año 2021, como consecuencia del incremento de exploraciones y explotaciones no convencionales de hidrocarburos, el consumo de agua ha aumentado en un 0,5 por ciento, lo que desencadenó en la implementación de una reglamentación técnica dirigida a la industria, que busca diseñar pozos que eviten las filtraciones

de agua, y que se puedan mantener las actividades de filtración hidráulica a distancia de diferentes afluentes como ríos o lagos.

### **3.3 Agua de producción**

El agua de producción, conocida también como agua de formación, hace referencia al agua obtenida junto con el fluido extraído (petróleo y el gas), durante los procesos de producción de pozos de hidrocarburos (Ebratth Salgado, 2011). Por su densidad, son capas que se encuentran por debajo de los hidrocarburos en los yacimientos, dicha agua puede originarse desde la zona de interés (agua connata), un acuífero activo adyacente (agua de intrusión) o un proyecto de inyección de agua (agua inyectada) (Cruz, Duque & Marulanda, 2015).

El hidrocarburo en yacimiento está acompañado por agua, y sin importar cuál sea el sistema de producción que se use, parte de esta agua va a acompañar al hidrocarburo hasta la superficie al momento de la extracción. Ya que en su mayoría se trata de aguas de origen marino y con un constante contacto con materia orgánica. Adicionalmente, las aguas de formación presentan alta salinidad, contenido de grasas, aceites y compuestos orgánicos e inorgánicos solubles e insolubles, sólidos suspendidos y disueltos, metales pesados y varios químicos utilizados para el proceso de producción de petróleo (Esparza Plata, R. A., 2016)

En la etapa inicial de la producción, la cantidad de agua producida ayuda a mejorar la recuperación de hidrocarburos, al servir como una fuente de energía para el yacimiento, sin embargo, a medida que aumenta la producción de hidrocarburos, la producción de agua también aumenta, ocasionando que la cantidad de agua extraída en superficie se convierta en una problemática. El agua acompaña a la industria durante toda la vida productiva de un campo

petrolero, acompañándolo desde el inicio de la explotación, hasta el abandono del campo, pasando por el desarrollo y la producción del mismo, por eso debe ser tratada, reutilizada y reusada en procesos dentro de la industria o en actividades que no estén relacionadas con la producción de hidrocarburos, o bien para su correcta disposición, siguiendo las leyes implementadas en cada región.

El agua de producción irá en aumento durante la vida útil del pozo hasta alcanzar un límite económico. (Bermúdez, O. A., 2017).

### **3.4 Características y contaminantes del agua producida por la industria del petróleo**

Las propiedades tanto físicas como químicas del agua producida en actividades de la industria petrolera son afectadas por diversos factores y varían dependiendo de la presencia o ausencia de cada uno, la edad geológica, la profundidad y la geoquímica de la formación que contiene el hidrocarburo, la composición de los hidrocarburos con los que interactúe el agua en yacimiento, así como otros productos químicos o aditivos usados durante la perforación y producción son algunos de los factores que se deben tener en cuenta, por esa razón se llega a la conclusión que la existencia de dos aguas de producción iguales no es posible (Arcila Gómez, Y. F., y Vargas Díaz, L. M., 2021). Las aguas de producción pueden contener mezclas complejas de componentes orgánicos polares y no polares, cationes inorgánicos y aniones, metales pesados, aceites y sólidos. En la tabla 2 se muestran las propiedades físico químicas y componentes del agua de producción.

**Tabla 2***Propiedades fisicoquímicas y componentes del agua de producción*

AGUA DE PRODUCCIÓN	
Propiedades	Alcalinidad y acidez
	Dureza
	Turbidez
Componentes	Sales
	Metales Pesados
	Sólidos
	Materia Orgánica
	Hidrocarburos disueltos y suspendidos

**Nota.** La gráfica muestra algunas de las propiedades fisicoquímicas y una revisión general de algunos de los componentes que encontramos en el agua de producción. Adaptado de Características del agua producida y su tratamiento para el aprovechamiento en la industria petrolera. (Valencia Ortiz, C.E., 2023).

La complejidad de la composición del agua producida radica principalmente en la gran variedad de componentes que hacen parte de ella, los cuales se pueden encontrar disueltos y suspendidos en forma de partículas o gotas; estos componentes se pueden dividir de manera general en compuestos orgánicos e inorgánicos, conteniendo también aceites disueltos y dispersos, grasas, metales pesados, radio-nucleídos, productos químicos de tratamiento, sólidos de formación, sales, gases disueltos, productos a escala, ceras, microorganismos y oxígeno disuelto (Valencia Ortiz, C.E., 2023).

Como sólidos disueltos (componentes inorgánicos) predominan cationes de sodio ( $\text{Na}^+$ ) y aniones de cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), por esta razón la salinidad del agua de producción se suele considerar similar a la salinidad del agua de mar. Además de encontrar cationes como el calcio ( $\text{Ca}^+$ ), magnesio ( $\text{Mg}^+$ ), hierro ( $\text{Fe}^+$ ), bario ( $\text{Ba}^{2+}$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), estroncio ( $\text{Sr}^+$ ), aluminio ( $\text{Al}^{3+}$ ) y litio ( $\text{Li}^+$ ) (Valencia Ortiz, C.E., 2023).

### ***3.4.1 Hidrocarburos***

Encontrados junto al agua de producción debido a su contacto en el yacimiento y durante la extracción del hidrocarburo. Se presentan como compuestos orgánicos, algunos de ellos son los BTEX, como benceno, tolueno, etilbenceno y xileno, fenoles e hidrocarburos aromáticos poli-cíclicos. Los aceites, en su gran mayoría son insolubles en agua, pero los hidrocarburos aromáticos y fenoles se pueden encontrar dispersos y disueltos en las aguas de producción. (Camacho Triana, J. L., 2020, p. 13).

Los compuestos BTEX, son los hidrocarburos de un anillo más abundantes en el agua de producción, junto con los saturados de menor peso molecular. Pueden alcanzar concentraciones de hasta 600mg/L. Debido a su volatilidad, se pueden llegar a perder muy fácilmente durante el tratamiento del agua.

Los hidrocarburos aromáticos poli-cíclicos (HAP), contienen una alta toxicidad y generan gran contaminación en los ambientes marinos. Son hidrocarburos de más de dos anillos aromáticos fusionados.

Los Fenoles son compuestos aromáticos orgánicos con uno o más grupos hidroxilos. Se pueden encontrar en gran variedad en las aguas de producción en pozos de petróleo y gas, pero se encuentran en mayor medida en pozos de gas condensado. Los más abundantes son el fenol,

dimetifenol y metifenol. (Prada Rojas, A. F., 2021). En la tabla 3 se muestran las cifras de agua extraída por cada zona.

**Tabla 3**

*Hidrocarburos presentes en aguas de producción*

<b>Compuesto</b>	<b>Concentración (mg/L)</b>
Benceno	0,032 – 14,97
Etilbenceno	0,086 – 0,57
Tolueno	0,058 – 5,86
m-Xileno	0,258 – 1,29
p-Xileno	0,074 – 0,34
o-Xileno	0,221 – 1,06
Total BTEX	0,73 – 24,1
Fenoles	0,009 – 23
Total HPA	0,0058 – 0,129
Grasas y Aceites	2 – 560
Hidrocarburos saturados	17 – 30
Naftaleno	0,194 – 0,841

*Nota.* En la tabla se muestran algunos de los hidrocarburos de petróleo más representativos encontrados en las aguas de producción. Tomado de Evaluación del manejo del agua en la extracción y producción de hidrocarburos con miras a la definición de alternativas de tratamiento y reúso. (Camacho Triana, J.,2020).

### ***3.4.2 Metales pesados***

La presencia de metales pesados junto al agua de producción está ligada a diversos factores, contacto del agua con formaciones, contacto con acuíferos, características geológicas y también las edades de los pozos productores. El agua actúa como solvente con estos metales al momento de entrar en contacto con las paredes de los yacimientos y es conducida hasta superficie, en donde debe ser sometida a un tratamiento que garantice una eliminación o reducción al mínimo de dichos metales contaminantes. El tratamiento de los metales pesados es de mucha importancia para procesos de reúso y reutilización del agua de producción, debido a que su presencia puede generar daños en las tuberías, en el ambiente y en personas y animales.

El agua de producción enfrenta cambios de profundidad, temperatura, presión y pH, lo que puede ocasionar la formación de cristales en las paredes de la tubería por la sobresaturación y acumulación de minerales, estos cristales aumentan de tamaño a medida que siguen adsorbiendo iones y se depositan en las tuberías generando obstrucciones o tapones. El no monitorear la presencia de metales pesados en las aguas de producción, pueden afectar el aire, agua y suelos, debido a su alta toxicidad.

Ingerir metales pesados debido al contacto directo con estos, o por medio de cultivos o animales que hayan sido afectados o tratados con el agua contaminada, puede provocar cáncer en el ser humano, enfermedades nerviosas y circulatorias. (Camacho Triana, J. L.,2020). En la tabla 4 se muestran los metales pesados presentes e el agua de producción.

**Tabla 4***Metales pesados presentes en el agua de producción.*

<b>Metal</b>	<b>Concentración (mg/L)</b>
Aluminio (Al)	310 – 410
Arsénico (As)	<0,005 – 0,3
Cadmio (Cd)	<0,005 – 0,2
Cromo (Cr)	0,02 – 1,1
Cobre (Cu)	<0,002 – 1,5
Litio (Li)	3 – 50
Manganeso (Mn)	<0,004 – 175
Mercurio (Hg)	<0,001 – 0,002
Plata (Ag)	<0,001 – 0,15
Plomo (Pb)	0,002 – 8,8
Zinc (Zn)	0,01 – 35

**Nota.** En la tabla se muestran los metales pesados encontrados en las aguas de producción.

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

### **3.4.3 Carbono orgánico total**

Hace referencia a la cantidad de carbono orgánico o materia orgánica presente en la roca expresado como porcentaje en peso, e indica la riqueza de la fuente con respecto a los

hidrocarburos que se pueden generar. Su composición en aguas de producción puede variar de 0,1 a más de 11000mg/L. (Arcila Gómez, Y. F., & Vargas Díaz, L. M., 2021).

#### 3.4.4 Químicos de producción

Dependiendo del problema operativo que tenga un pozo de petróleo o gas, se utilizan productos químicos para solucionarlo, para separar el petróleo del gas y el agua, y prevenir corrosiones en tuberías o formación de hidratos en la producción de gas metano.

Hay tres tipos de productos químicos usados generalmente por la industria del petróleo. Como son: Productos químicos de procesamiento de gas, usados en procesos de simulación y workover, productos químicos de tratamiento de producción, utilizados en el tratamiento de incrustaciones y corrosión y; productos químicos para el tratamiento de agua, que hace referencia a los utilizados en floculantes y antiespumantes, rompe emulsiones y emulsiones inversas. (Prada Rojas, A. F., 2021). En la tabla 5 se muestran los químicos presentes en el agua de producción.

**Tabla 5**

*Químicos presentes en el agua de producción.*

Químicos de producción	Concentración (mg/L)
Glicol	7,7 – 2000
Inhibidor de corrosión	0,3 – 10
Inhibidor de incrustaciones	0,2 – 30

**Nota.** En la tabla se muestran los principales químicos de producción encontrados en las aguas de producción. Tomado de Evaluación del manejo del agua en la extracción y producción de

hidrocarburos con miras a la definición de alternativas de tratamiento y reúso. (Camacho Triana, J.,2020).

### **3.4.5 Salinidad**

Característica usual en aguas de producción, debido principalmente a tratarse de aguas de origen marino, ricas en iones de sodio y cloruro. Presentan concentraciones importantes de iones de calcio, magnesio, potasio, bicarbonato y sulfato.

Hay una relación entre los iones inorgánicos y el tipo de hidrocarburo presente, cuando hay presencia de gas la salinidad es baja y alta cuando se trata de petróleo. La salinidad del agua de mar tiene valores promedio de 35.000 ppm. En aguas de producción esta concentración puede variar desde 5.000 mg/L hasta  $3 \cdot 10^8$  mg/L. (Camacho Triana, J. L., 2020, p. 13).

#### **3.4.5.1 Sales disueltas en forma de cationes.**

Dentro de las sales disueltas que se pueden encontrar en las aguas de producción, se encuentran algunas que se presentan en forma de cationes, las más representativas en el sector hidrocarburo son:

Calcio ( $Ca^{2+}$ ): Se trata del residuo más abundante en aguas de producción. Alcanzando valores de hasta 30,000 mg/L. Este ion puede presentar combinaciones con iones sulfatos, bicarbonatos o carbonatos, generando incrustaciones de carbonato de calcio ( $CaCO_3$ ) o sulfato de calcio ( $CaCO_4$ ), lo que puede significar también la generación de sólidos suspendidos. (Vallejo, 2011).

Sodio ( $Na^+$ ): Correspondiente al catión más abundante en las salmueras petroleras. Encontrándose en concentraciones mayores a 35,000 (ppm) (Vallejo, 2011).

Magnesio ( $Mg^{2+}$ ): Presente en las salmueras petroleras, característico por su capacidad de formar incrustaciones inorgánicas como carbonato de magnesio y/o carbonato de calcio-magnesio (ACIPET, 2006).

Hierro ( $Fe^{3+}$ ,  $Fe^{2+}$ ): Indicadores de corrosión en las tuberías de producción. Presentes en solución como ion férrico ( $Fe^{3+}$ ) ion ferroso ( $Fe^{2+}$ ) o en suspensión como un compuesto de hierro precipitado.

Bario ( $Ba^{2+}$ ): Perteneciente al grupo de los metales pesados, con la característica de combinarse con el ion sulfato y formar sulfato de bario ( $BaSO_4$ ), insoluble y conocido por su dificultad para ser removido aun cuando se encuentra en pequeñas cantidades.

Estroncio ( $Sr^{2+}$ ): Genera el sulfato de estroncio, al combinarse con el ion sulfato, que de la misma forma al bario resulta ser insoluble. (ACIPET, 2006).

### **3.4.5.2 Sales disueltas en forma de aniones.**

En aguas de producción, regularmente se encuentran iones como:

Cloruro ( $Cl^-$ ): Correspondiente a uno de los componentes con mayor presencia en las salmueras usadas en la industria del petróleo. Su principal fuente es el NaCl. Este ion es usado regularmente para el cálculo de salinidad en el agua, entre más salada es el agua de la formación, la corrosión producida será mayor. Su uso es de vital importancia en la industria, debido a que la determinación de la concentración de cloruro es una de las formas más sencillas para identificar el tipo de agua con la que se está trabajando. (Abad, 2017). En la tabla 6 se muestra la clasificación del agua de producción según su concentración de cloruro de sodio

**Tabla 6**

*Clasificación del agua de producción según su concentración de cloruro de sodio.*

<b>Tipo de agua</b>	<b>Concentración de cloruro de sodio</b>	<b>Unidad</b>
Agua dulce	0 – 2000	Ppm
Agua salobre	2000 – 5000	Ppm
Agua salada	5000 – 40.000	Ppm
Salmuera	>40.000	Ppm

**Nota.** La tabla muestra la clasificación del agua de acuerdo al contenido presente de cloruro de sodio. Tomado de Características del agua producida y su tratamiento para el aprovechamiento en la industria petrolera. (Valencia Ortiz, C.E., 2023).

Sulfato ( $SO_4^{2-}$ ): El sulfato puede presentar reacciones con el calcio, el bario, y el estroncio, provocando la formación de sólidos insolubles. Buscando mejorar la recuperación de hidrocarburos, se puede acudir a la inyección de agua de mar a la formación, la cual contiene una alta concentración de sulfato debido a su origen, se origina una mezcla con el agua de formación, que puede generar incrustaciones en las tuberías de producción.

Bicarbonato ( $HCO_3^-$ ) y Carbonato ( $CO_3^{2-}$ ): Debido a su bajo pH, su presencia en aguas de producción llega a ser relativamente baja, sin embargo, estos iones pueden reaccionar con los iones calcio, magnesio, hierro, bario y estroncio y formar incrustaciones insolubles que pueden representar un problema durante la producción del hidrocarburo. (Vallejo, 2011).

En conclusión, el agua de producción contiene las mismas sales que el agua de mar, siendo los iones inorgánicos más abundantes el sodio, cloro, calcio, magnesio, potasio, sulfato, bromuro, bicarbonato y yoduro (Neff, Lee, & DeBlois, 2011). En la tabla 7 se muestran las concentraciones de iones inorgánicos en aguas de producción

**Tabla 7***Concentraciones de iones inorgánicos en aguas de producción.*

<b>Fuente</b>	<b>Neff</b>	<b>Ortega</b>	<b>Dudek</b>	<b>Klemz</b>
<b>Ion</b>	<b>Concentración en (mg/L)</b>			
Sodio ( $Na^+$ )	23000-57300	1490	5000-43600	132-97000
Cloruro ( $Cl^-$ )	46100-141000	2570	12400-81000	80-200000
Calcio ( $Ca^{+2}$ )	2530-25800	429	151-5700	13-25800
Magnesio ( $Mg^{+2}$ )	530-4300	72,3	25-791	8-6000
Potasio ( $K^+$ )	130-3100	124	160-744	24-4300
Sulfato ( $SO_4^{-2}$ )	210-1170	8,2	18-1650	2-1650
Bromuro ( $Br^-$ )	46-1200	287	-	-
Estroncio ( $Sr^{+2}$ )	7-1000	-	-	1-1000
Amonio ( $NH_4^+$ )	23-300	-	-	10-300
Bicarbonato ( $HCO_3^-$ )	77-560	378	420-1430	77-3990
Yoduro ( $I^-$ )	3-210	-	-	-
Carbonato ( $CO_3^{-2}$ )	30-450	1	-	-
Litio ( $Li^+$ )	3-50	-	-	3-50

**Nota.** La tabla muestra concentraciones de iones inorgánicos en diversas muestras de agua de producción. Tomado de Modelamiento de procesos de aprovechamiento energético del agua de producción de un campo petrolero mediante ciclos de potencia. (Barón Granados, J.M., 2023).

Según la clase de hidrocarburo, o si se trata de petróleo o gas natural, y su composición química, además de las características del agua, el hidrocarburo y el yacimiento, la cantidad

presente de contaminantes en el agua puede variar. Por ejemplo, cuando se trata de un campo productor de gas natural, el agua de formación alcanza 10 veces más toxicidad que un agua producida en un yacimiento de petróleo, pero en un campo productor de petróleo, la cantidad de agua producida es mucho mayor. En cuanto a las características del yacimiento, el agua de producción varía de acuerdo a su edad, ubicación, profundidad y de las propiedades geoquímicas de la formación geológica.

Durante un proyecto de extracción de hidrocarburos, el pozo es sometido a distintos procesos desde su perforación hasta su puesta en producción y su mantenimiento a lo largo de su vida productiva. Durante todos estos procesos, son agregados distintos químicos y aditivos que buscan brindar una solución a los diversos problemas que se llegan a presentar durante dichas operaciones. Agua, gas y otros fluidos son inyectados al pozo con el fin de añadir presión y mantener la correcta producción, sustancias que con el tiempo van a volver a superficie, aumentando el volumen de agua extraído. Todo esto sumado a los contaminantes propios del agua de formación ocasionan que el agua proveniente del yacimiento, al subir a superficie, esté contaminada con químicos, sólidos y fluidos. Por eso, una vez es extraída, el agua de formación es conocida como agua de producción, haciendo referencia a las características adicionales que le fueron añadidas en este proceso (J. a. Veil et al., 2004). El manejo que se le da al agua de producción debe tener en cuenta no solo las características propias del agua de formación sino además los contaminantes adicionados.

Determinar la cantidad de contaminantes y su concentración es de vital importancia para poder establecer el daño ambiental generado en su vertimiento y también seleccionar las opciones de manejo que se le puede dar al agua generada. La correcta elección del sistema de tratamiento, va a permitir que se consiga un proceso sin sobrecostos, centrándose en el objetivo principal de

eliminar o reducir dichos componentes, de manera que el agua resultante cumpla la normatividad establecida y pueda ser dispuesta o reutilizada sin que genere afectaciones o represente un peligro para el ecosistema.

### **3.5 Sales orgánicas e inorgánicas**

Las sales son compuestos químicos formados por cationes y aniones que están unidos por fuerzas electrostáticas (enlaces iónicos). Se pueden formar por reacciones ácido-base, son solubles en agua y pueden formar cristales. Los iones que forman la sal, pueden ser orgánicos, es decir, que tienen enlaces carbono e hidrogeno o inorgánicos que se caracterizan por la ausencia de estos.

Las aguas residuales de actividades petroleras, son en su mayoría de origen marino, además de formaciones en donde el agua está en contacto con minerales y fluidos que le dan características muy particulares, sobre todo en lo referente a la salinidad.

Estas aguas son altamente salinas, con altas concentraciones de minerales y crudos disueltos. Además de una mezcla de agua proveniente de acuíferos, agua lluvia filtrada y agua que estaba presente en la roca madre.

Los niveles de cloruros en aguas de producción pueden alcanzar valores entre 13,000 y 180,000 ppm, y, los sólidos totales en suspensión pueden alcanzar las 200 ppm. (Dávila Puentes, J. A., 2024).

En cuanto al porcentaje de agua y sedimentos (BSW) presentes en el petróleo, el valor debe estar por debajo de 0,2% a 0,6% en volumen. Los oleoductos y las refinerías aceptan valores en concentración de sal de 10 a 20 PTB (libras de sal por cada 1000 barriles de crudo). Esto, debido a los daños que puede ocasionar el alto contenido de sal, provocando corrosión y daño en tuberías y equipos (Orejuela, H. M. A., 2023).

### ***3.5.1 Sales Orgánicas***

Se forman por reacciones entre grupos funcionales ácido-base. En los grupos básicos, se encuentran las aminas aromáticas, cíclicas y amino piridinas. Dentro del grupo de los ácidos están los fenoles, ácidos carboxílicos, sulfonamidas y carboxílicos (Lara, J. C. O., & López, A. B., 2017).

En el desarrollo del presente proyecto, se usó el Azul de metileno como una molécula representativa de los materiales orgánicos, al tratarse de un cloruro, se utilizó como una sal orgánica presente en las aguas residuales de actividades en la industria petrolera.

#### **3.5.1.1 Azul de metileno.**

Su fórmula molecular es  $C_{16}H_{18}ClN_3S$ , se trata de un colorante usado para teñir madera, algodón y seda. No es tóxico, pero su contacto permanente puede generar efectos nocivos para el ser humano, su consumo puede provocar vómito, dolores de estómago y problemas respiratorios. (Moreno, A., Figueroa, D., & Hormaza, A., 2012).

La adsorción de colorantes con carbón activado es eficiente, sin embargo, sus altos costos, hacen que dichos procesos no sean viables económicamente. Por eso, la búsqueda actual se centra en carbones activados más económicos y eficaces, que aumenten la adsorción de azul de metileno y reduzcan sus costos de producción (Chaparro, C. V., Cabanzo, R., & Ospino, E. M., 2014).

### ***3.5.2 Sales Inorgánicas***

Compuestas por aniones y cationes, se pueden formar producto de una reacción ácido-base, pero no presentan enlaces de carbono. Algunas sales contienen potasio, cloruro, magnesio y sodio.

Se encuentran en el petróleo crudo y se disuelven en el agua que lo acompaña en los reservorios, deben ser tratadas, debido a que pueden generar aniones ácidos al entrar en contacto con el agua, lo que puede llegar a ocasionar daños corrosivos en tuberías y equipos (Orejuela, H. M. A., 2023).

A pesar de las múltiples sales inorgánicas presentes en las aguas residuales de la industria petrolera, el estudio de este proyecto está enfocado en dos de ellas, el dicromato de potasio y el sulfato de plata.

#### **3.5.2.1 Dicromato de Potasio.**

Es una sal inorgánica de color naranja-rojizo, su fórmula química es  $K_2Cr_2O_7$ , es soluble en agua, y se produce como una mezcla entre el cloruro de potasio y el dicromato de sodio. Se utiliza como toxico de referencia en pruebas de toxicidad acuática, puede ser usado en explosivos, curtido de cuero, baterías, ceras, inhibidor de corrosión, colorantes, pirotecnia, cerámica, esponjas e impresión (Hoja de seguridad XIV de Dicromato de Potasio, 2008).

El cromo tiene efectos tóxicos cuando entra en contacto con el agua y puede provocar cáncer, sobre todo cuando está en la forma de dicromato de potasio. Es un metal pesado natural y se utiliza frecuentemente en la industria del acero, la metalurgia, aerosoles, fotografía, etc. (Parveen, K., Khan, M. R. y Siddiqui, W. A., 2009).

#### **3.5.2.2 Sulfato de Plata.**

De color blanco sólido y cristalino, el sulfato de plata es una sal inorgánica de fórmula química  $Ag_2SO_4$ . Se produce por la precipitación de una solución de ácido sulfúrico con nitrato de

plata. Es usado en aplicaciones de enchapado de plata o para cubrir materiales de plata. También es usado para fines medicinales, debido a que sirve como agente antibacteriano.

### **3.6 Uso y disposición del agua resultante en actividades de la industria del petróleo**

Mundialmente, según los objetivos de desarrollo sostenible, el número 6, agua limpia y saneamiento, el objetivo enfocado en la gestión de agua, la meta para el año 2030 es garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y saneamiento para todos (Instituto de Salud Global, 2018).

En la actualidad, la escasez de agua representa un problema para más del 40% de la población mundial, porcentaje que aumenta debido a los constantes y en aumento, problemas ambientales, cambio climático, deforestación y uso indebido del recurso. Por lo tanto, es obligatoria la implementación de tecnologías, infraestructura, gestión mundial y uso racional del agua.

A pesar de los diferentes tratamientos a los que es sometida el agua, la cantidad producida por la industria petrolera puede llegar a ser lo suficientemente alta como para sobrepasar la capacidad de las plantas de tratamiento, y la industria debe buscar solución para la disposición del agua en actividades ajenas a la industria y su disposición de acuerdo a las leyes de cada región.

Uno de los métodos de disposición más usado, consiste en verter el agua producida, después de ser tratada, dentro de cuerpos de agua. Sin embargo, si la capacidad de estas fuentes hídricas es superada por la cantidad de agua producida, por lo tanto, debe ser usada en otras actividades en superficie. Usar el agua para rociar los caminos en invierno y aprovechar su salinidad para derretir el hielo, o en verano rociarla para controlar el polvo, son algunas de las

actividades en las que el agua se usa en beneficio de la comunidad y permitiendo así a la industria disponer de la cantidad excesiva de agua con la que muchas veces debe combatir (Ortega Ramírez, A.T, Arcila, Y.F Y Vargas Díaz, L.M, 2020).

Otra de las disposiciones finales del agua producida, es la inyección en el subsuelo, ya sea para usar durante la recuperación secundaria de petróleo o para disponerla en pozos dispoales creados específicamente para este tipo de actividades.

Además de las actividades mencionadas anteriormente, que son las formas más comunes de disposición y uso del agua, la industria se ha visto obligada a buscar nuevas formas de usar el agua procedente de sus diferentes actividades. Los rubros agrícola e industrial, han sido algunos de los ambientes en los que más ha sido aprovechada el agua producida, usada para actividades de riego de cultivos, revestimiento de zonas áridas y riego de cultivos hidropónicos y de pastoreo con fines de alimentación ha ganado o en actividades industriales que ocupan grandes cantidades de agua (Galvis Briñez, 2011), han sido algunos de los usos externos que ha tenido el agua de producción.

En México, por ejemplo, en las plataformas ubicadas en el golfo de México, el agua de producción es descargada al océano (García et al., 2017, p. 95). En Argentina, donde se cuenta con grandes plantas de tratamiento de agua, el agua es sometida a procesos de tratamiento y luego es distribuida en pozos inyectores de agua, contando con cerca de 3000 pozos inyectores solamente en la cuenca de San Jorge (Hirschfeldt, 2015, p.3).

En actividades referentes al reúso del agua (actividades en otras industrias), han sido varios los proyectos en los que se busca usar el agua producida en el mejoramiento de vías, cultivos o zonas con problemas debido a condiciones climáticas cambiantes y severas. Algunos de los

proyectos de reúso conocidos en el mundo, y que sirven como una representación del éxito de la fusión entre la industria del petróleo y otras actividades en industrias fuera de ella son:

Reverdecimiento en el desierto de Libia, usando humedales como parte del tratamiento y sembrado de plantas nativas de dicho desierto. El agua de producción usada en ese proyecto fue de aproximadamente 377 a 500 Barriles por día. (Guirguis, 2004) (Díaz, Zamora, Caselles-Osorio & León, 2013).

Uso de aproximadamente 12500 Barriles diarios de agua, en un proyecto de riego, usando el agua resultante de un proceso de producción de metano (Galvis Briñez, 2011).

Aprovechamiento de aproximadamente 250.000 m<sup>3</sup>/d de agua en el desierto de Omán, que se usan para el mantenimiento de los pozos petroleros y adicionalmente usados en el diseño de humedales para el almacenamiento del agua para uso en actividades agrícolas de la zona (Breuer y Rashid Al-Asmi, 2010, p. 07).

En la industria química, el uso de salmueras en la fabricación de soda caustica, jabones, cosméticos, entre otros. Aprovechando la salinidad del agua producida, ha tomado fuerza los últimos años, debido a sus beneficios económicos y ambientales (Ortega Ramírez, A.T, Arcila, Y.F Y Vargas Díaz, L.M, 2020).

En Estados Unidos, algunos de las actividades en donde se presenta mayor aprovechamiento del agua producida por la industria de los hidrocarburos son, bebedero para el ganado, irrigación, aumento del caudal de la corriente, restauración de pastizales y distintos usos industriales (Valencia Ortiz, C. E., 2023).

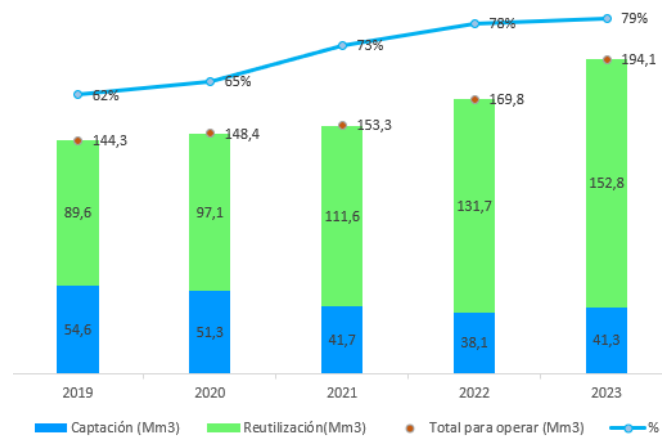
### 3.7 Disposición, normas y objetivos de manejo del agua de la industria del petróleo en Colombia

Para el año 2023, Ecopetrol reportó que el agua usada para el desarrollo de sus diferentes actividades alcanzó un volumen de 194,1 millones de metros cúbicos. Las cifras corresponden a un 79% (152,8 millones de metros cúbicos) proveniente de la reutilización de efluentes, y solamente el 21% (41,3 millones de metros cúbicos) fue obtenido de fuentes naturales o comprado a acueductos (Ecopetrol, 2024).

A pesar de que el requerimiento de agua para las operaciones de la industria ha aumentado, Ecopetrol ha informado que la cantidad de agua producto de la reutilización y tratamiento, ha presentado un significativo aumento, pasando de un 56% en 2017 a un 79% en 2023 (Figura 1) (Ecopetrol, 2024). Esto demuestra el compromiso de la industria en el mejoramiento de la disposición y uso del recurso, y una disminución significativa en el uso de agua proveniente de fuentes naturales o acueductos.

#### Figura 1

*Agua requerida para operar, captación y reutilización.*



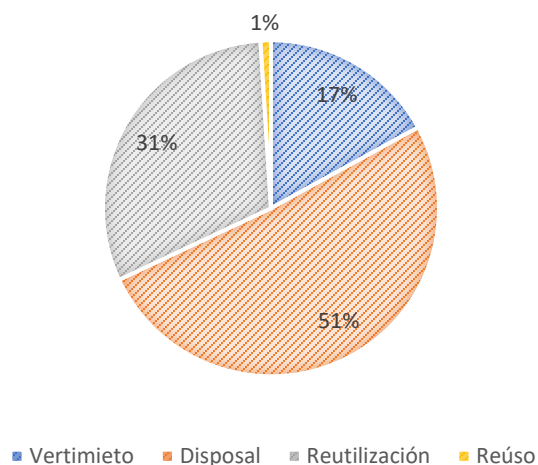
*Nota.* El gráfico representa la cantidad de agua requerida para operar, su volumen obtenido por captación y reutilización respectivamente. Adaptado de Eficiencia operativa del agua (Ecopetrol, 2024)

En Colombia, la inyección de agua, disposición en vertimientos, reutilización, tratamiento, uso en otras industrias (agricultura en su mayoría), entre otros, son algunos de los mecanismos empleados para el manejo del agua producida (Mesa, S. L, Orjuela, J. M, Ortega, A. T, Sandoval, J. A, 2018).

En su mayoría, el agua es sometida a una inyección subterránea en pozos dispoales, representando, según Ecopetrol en 2023, un 51% del total de la disposición del recurso, seguido por la reutilización con un 31%, y en menores cantidades, pero igual de significativas el vertimiento y el reúso (Figura 2).

## Figura 2

*Alternativas de uso y disposición de efluentes en Ecopetrol*



*Nota.* El gráfico representa las diferentes alternativas que tiene Ecopetrol para sus efluentes.

Adaptado de Eficiencia operativa del agua (Ecopetrol, 2024).

En el año 2021, Ecopetrol lanzó su conocida estrategia 2040, la cual hace parte de su objetivo operacional y económico para el periodo 2022-2024, la estrategia denominada “Energía que transforma”, busca brindar un manejo integral y completo para los retos actuales en los escenarios ambiental, social, económico y gubernamental, con el principal objetivo en el equilibrio entre la generación de valor sostenible para todos sus escenarios de interés (Ecopetrol, 2021).

El principal objetivo de implementar una gestión integral del agua, es promover el uso responsable del recurso, generando procesos responsables de extracción, vertimiento y reducción, garantizando así la disponibilidad y continuidad del suministro actual y futuro del agua (Ecopetrol, 2023).

La llamada “Agua neutralidad”, hace parte de una de las ambiciones de la industria colombiana, consiste en la búsqueda del balance entre el agua requerida por la industria para sus distintas actividades y las acciones que toman para reducir su huella sobre el recurso, tomando en cuenta valores económicos y técnicos, que representen un impacto positivo dentro de la búsqueda de soluciones en el manejo correcto del agua. En la tabla 8 se enumeran las líneas estratégicas “Agua neutralidad”.

### **Tabla 8**

*Líneas estratégicas “Agua neutralidad”.*

<b>Líneas estratégicas del proyecto “Agua neutralidad”</b>		
<b>Eficiencia operativa en el</b>	<b>Integración de conocimiento y</b>	<b>Sostenibilidad y seguridad</b>
<b>manejo del agua</b>	<b>tecnología</b>	<b>hídrica del entorno</b>

---

<p>Habilitar tratamientos adecuados</p> <p>Su objetivo, es disminuir la captación de agua fresca, además de la carga y volumen de vertimientos.</p>	<p>Busca mejores condiciones en costo y beneficio, para el reúso hídricas de las cuencas abastecedoras y la compensación por parte de la producción en superficie y el uso industria.</p> <p>de fuentes alternativas.</p>
---	---

---

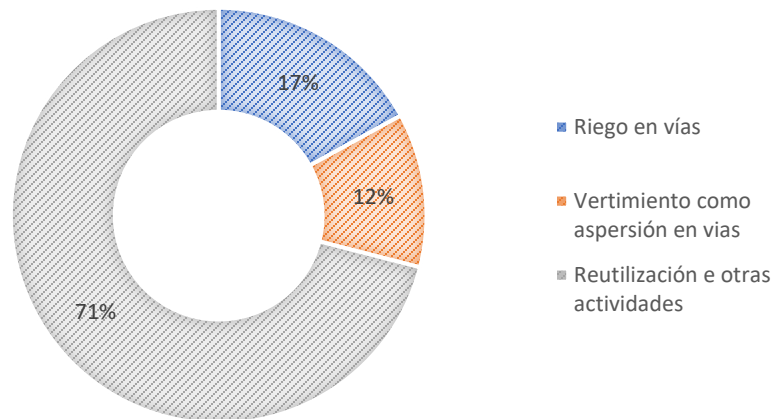
**Nota.** En la tabla se enumeran las líneas estratégicas dentro de la hoja de ruta del proyecto “Agua neutralidad”. Adaptado de Informe Integrado de Gestión 2023 (Ecopetrol, 2023).

En cumplimiento con la normatividad ambiental para vertimientos de agua, Colombia tiene sus propios parámetros, niveles máximos y mínimos permisibles, los cuales están expuestos en tres resoluciones, una centrada en los vertimientos a cuerpos de agua superficial, otra en los vertimientos sobre aguas marinas y la última en vertimientos de aguas al suelo (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible).

Con el objetivo de lograr las metas a corto y largo plazo en el manejo del agua, la industria colombiana busca día a día dar cumplimiento con los valores establecidos, y un aumento en actividades de reutilización (aprovechamiento dentro de la industria) y reúso (aprovechamiento en otras actividades). En la figura 3, se pueden observar los porcentajes correspondientes a actividades de reúso y reutilización de las aguas de producción en Colombia.

**Figura 3**

*Reúso y reutilización de las aguas de producción en la industria colombiana.*



*Nota.* El gráfico muestra los porcentajes correspondientes a actividades de reúso y reutilización del agua de producción en Colombia. Adaptado de *Evaluación del manejo del agua en la extracción y producción de hidrocarburos con miras a la definición de alternativas de tratamiento y reúso.* (Camacho Triana, J. L., 2020).

**3.7.1 Reúso**

El uso de aguas residuales de actividades asociadas a la producción de hidrocarburos en Colombia en actividades ajenas a la industria petrolera, es una de los principales objetivos dentro de la búsqueda de alternativas a la disposición de dicho recurso, buscando que el agua sea usada en distintas actividades y así, haya una disminución en el vertimiento de la misma.

En la industria agrícola, el agua puede ser usada en actividades de riego, consumo animal, cultivos de fibras celulósicas, obtención de biocombustibles, cultivos de madera, entre muchos otros. Además, puede ser usada para riegos de cultivos alimenticios para las comunidades, esto

después de que el agua sea sometida a un tratamiento y cumpla con algunos parámetros específicos. Adicionalmente, el agua es usada para el riego de zonas verdes en parques o zonas deportivas (Camacho Triana, J. L., 2020).

En actividades industriales, su uso puede estar presente en actividades como, intercambio de calor en torres de enfriamiento y calderas, descarga de aparatos sanitarios, limpieza mecánica de vías, riego de vías para el control de material particulado y sistemas de redes contraincendios (Camacho Triana, J. L., 2020).

Según Ecopetrol, para el año 2023, las cifras de reusó en Colombia correspondieron a 5,09 millones de m<sup>3</sup> de aguas de producción tratada, de los cuales 3,6 millones de m<sup>3</sup> corresponden al Campo Castilla para el riego de cultivos forestales en el Área de Sostenibilidad Agro-energética (ASA) y 1,5 millones de m<sup>3</sup> correspondientes al Campo Rubiales para el proyecto piloto de riego de cultivos forestales en el Área de Sostenibilidad (SAARA) que equivale al 1% del total de aguas de producción. Con respecto al año anterior, se presentó un aumento del 35%, debido a la puesta en marcha del proyecto (SAARA) en el Campo Rubiales (Ecopetrol, 2024).

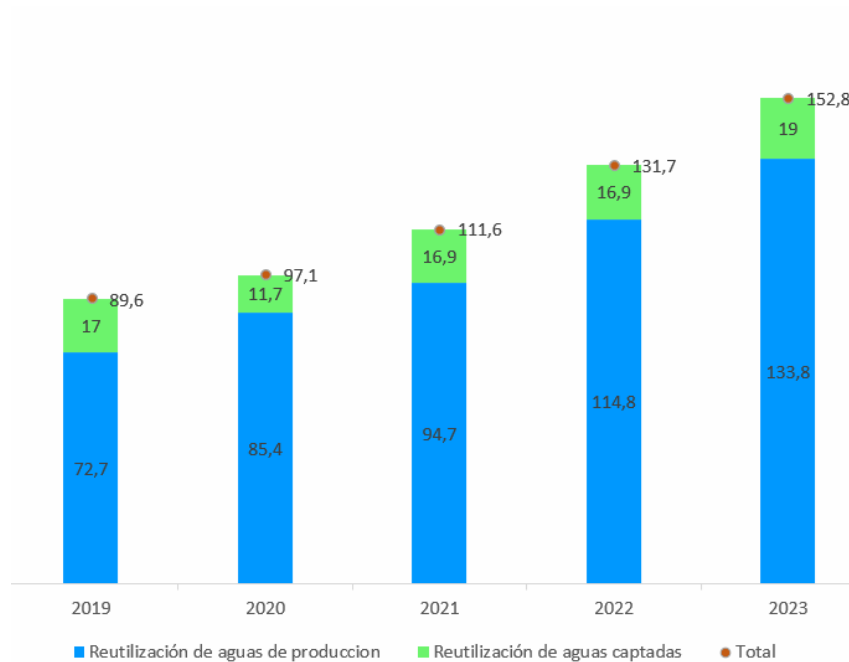
### ***3.7.2 Reutilización***

La reutilización del agua, hace referencia al uso del agua residual dentro de actividades en la misma industria, representando un tipo de reciclaje y aprovechamiento de dicho recurso. Dependiendo de la actividad, el agua debe ser tratada antes de ser reutilizada, esto con el fin de no generar problemas con equipos o tuberías, y garantizar el cumplimiento de las normas específicas de cada actividad. En Colombia, la reutilización del agua residual, es una actividad obligatoria, por lo tanto, la industria petrolera, debe implementar proyectos para su aplicación, además de un análisis obligatorio de su impacto ambiental y económico (Camacho Triana, J. L., 2020).

Según Ecopetrol, para el año 2023, 152,8 millones de m<sup>3</sup> de agua fueron reutilizados, representando un 79% del volumen total de agua requerida para operar. Con respecto a los valores del 2022, se presentó un aumento del 16% (Figura 4).

#### Figura 4

*Reutilización del agua en Colombia.*



**Nota.** El gráfico muestra las cifras referentes a la reutilización del agua en Colombia. Adaptado de *Eficiencia operativa en el manejo de agua*. (Ecopetrol, 2024).

### 3.8 Tratamiento del agua producida por la industria petrolera

El agua procedente de actividades dentro de la industria, es tratada en su mayoría con el fin de ser reinyectada al yacimiento para mantener o incrementar su presión y energía. Sin embargo, la cantidad de agua producida muchas veces se convierte en un problema, debido a que su cantidad puede llegar a ser muy alta, por lo que aproximadamente un 40% debe ser vertida en

el ecosistema, (Society of Petroleum Engineers & SPE, 2018). Por eso, implementar procesos de tratamiento, aprovechamiento, reutilización y reúso de agua en la industria, se convierte en una actividad obligatoria, para lograr una disminución en el impacto ambiental y afectaciones en el ecosistema y la población. La meta, es lograr una disminución significativa o en un escenario ideal la completa eliminación de los efectos negativos de las aguas residuales en procesos petroquímicos y un correcto manejo de los residuos en cuestión.

Al tratarse de una mezcla de diversos componentes, el agua producida por la industria se debe tratar sea cual sea su destino o uso al que vaya a ser sometida, esto con el objetivo de evitar afectaciones ambientales, económicas o problemas con la normatividad de la región (Camacho Triana, J. L., 2020).

Para lograrlo, la industria se ha encaminado en la búsqueda de implementación de distintas rutas, algunas de las cuales van dirigidas a disminuir los contaminantes que puedan llegar a ser vertidos en el ecosistema y otras que centran su objetivo en encontrar diferentes alternativas de uso y disposición de esta agua.

Para la elección del tratamiento, existen varios factores que se deben tener en cuenta, tipo de agua a tratar, si se van a tratar gases disueltos, hidrocarburos ligeros, aceites o grasas, partículas suspendidas, elementos orgánicos solubles, sales disueltas, arena, etc, la formación geológica y la región.

El tratamiento de efluentes en la industria del petróleo, se pueden dividir en tres grupos, dependiendo de sus características, proceso y equipos usados, además del tipo de agua tratada. Dichas características se enumeran a continuación: En la tabla 9 se hace un pequeño resumen de los equipos usados para tratamiento de agua y sus características.

**Tabla 9***Clasificación tratamiento de aguas de producción.*

<b>Tratamiento</b>	<b>Características</b>
Primario	<p>Permite la separación de los contaminantes y fases presentes en el agua, mediante la aplicación de principios y propiedades físicas. La aplicación de este tratamiento da como resultado un agua casi libre de crudo y una cantidad mínima de sólidos disueltos.</p>
Secundario	<p>Se usa para el tratamiento de los contaminantes que el tratamiento primario no pudo remover. Este tratamiento permite la separación de emulsiones e impurezas más pequeñas presentes en el agua. Dentro de este grupo podemos encontrar procesos de gasificación, que atrapan las partículas que se desean remover.</p>
Terciario	<p>Se realiza mediante el uso de procesos químicos, además de materiales adsorbentes, membranas y procesos de oxidación. Su principal objetivo es lograr un agua libre de contaminantes, incluso los más difíciles de remover. Este tipo de tratamiento es usado generalmente en aguas que necesitan cumplir con las especificaciones técnicas requeridas para diversos tipos de actividades, dentro de este grupo se encuentra el uso de membranas, adsorción, carbones activados, nanopartículas, entre otros.</p>

*Nota.* En la tabla se describen los tipos de tratamiento de agua usados en la industria del petróleo. Adaptado de Eliminación de compuestos orgánicos en aguas residuales utilizando nanopartículas de SiO<sub>2</sub>-carbón activado a base de cáscara de cacao. (León, AY, Contreras-Arenas, JD, Garnica-Fuentes, CF et al., 2023).

### ***3.8.1 Métodos de tratamiento físicos***

Hacen parte del grupo de tratamientos primarios, que son aquellos a los que es sometida el agua al inicio del proceso de eliminación de contaminantes, es decir la eliminación de los contaminantes más grandes, sólidos suspendidos, material flotante, etc.

Los tratamientos físicos, no buscan la creación de sustancias o destrucción de las mismas, sino que funcionan mediante el aprovechamiento y aplicación de fenómenos como la gravedad, la interacción entre partículas, la atracción eléctrica o el uso de barreras para la retención de los contaminantes. En los procesos físicos, los componentes no son sometidos a cambios en su estructura, sino que se someten a variaciones de temperatura, presión o distintos fenómenos físicos que ayudan en su manejo (Camacho Triana, J. L., 2020).

Algunos de los tratamientos usados por la industria de los hidrocarburos, se enumeran a continuación:

Adsorción.

Ciclones

Evaporación

Flotación mejorada

Electrodialisis

Sus principales características, porcentaje de remoción, contaminante removido, etc, se presentan en la tabla 10.

**Tabla 10**

*Métodos físicos para el tratamiento de agua.*

Método Físico	Contaminantes Removidos	Características
Adsorción	Grasas y aceites, algunos metales, BTEX, Hidrocarburos del petróleo.	Amplia capacidad para la retención de contaminantes, disminuye su concentración hasta valores menores a un microgramo por litro (Daigle, 2012) disminución cercana al 80% de los metales pesados presentes en el agua. Es útil en la separación de componentes orgánicos e inorgánicos (Jiménez et al., 2018).
Ciclones	Arena y petróleo disperso	Remoción de contaminantes disueltos, separación de arena y petróleo presentes en las aguas de producción. Ventajas: Su larga vida útil, sin necesidad de tratamientos químicos previos. (Heydari et al., 2013; Igunnu y Chen, 2012; Nasiri y Jafari, 2017).
Evaporación	Grasas, aceites, sales y metales pesados	Recuperación de sustancias valiosas o peligrosas, uso de calor que es agregado al agua, generando vapor y resultando en una condensación en forma de agua pura (Al-Ghouti et al., 2019; Mesa et al., 2018; Pankratz, 2000).

Flotación mejorada	Partículas finas, coloidales, ultra finas, sedimentos orgánicos e inorgánicos, grasas y aceites dispersos.	Ambiente de altas presiones, el aire se disuelve y genera la formación de micro burbujas al expulsar el agua a presión atmosférica en la celda de flotación, las micro burbujas se unen a las partículas del agua y generan un aumento en su flotabilidad, flotación por aire disuelto (DAF). (Al Shamrani, 2002; Azevedo et al., 2018).
Electrodiálisis	Sales, solidos disueltos.	Usado en la remoción de sales, sin embargo, no funciona en otro tipo de moléculas. Consiste en un proceso de separación electroquímica, impulsada por cargas en la que los aniones y cationes de las sales dentro del agua, se unen a electrodos específicos de carga opuesta. Altos costos. (Fakhru'l-Razi et al., 2009; Nasiri et al., 2017; Xu y Huang, 2008).

**Nota.** En la tabla se muestran los métodos físicos usados para el tratamiento del agua producida por la industria de los hidrocarburos. Adaptado de Evaluación del manejo del agua en la extracción y producción de hidrocarburos con miras a la definición de alternativas de tratamiento y reúso (Camacho Triana, J. L., 2020).

### 3.8.2 Métodos de tratamiento químicos

Como parte del grupo de tratamientos secundarios, junto a los tratamientos biológicos, son usados en la etapa secundaria de descontaminación del agua, removiendo materia orgánica disuelta o en suspensión que no fue eliminada por los tratamientos físicos en la etapa primaria (Camacho Triana, J. L., 2020), Al tratarse de procesos que involucran el uso de químicos, se generan reacciones químicas que disminuyen la presencia de contaminantes en el agua (Salamanca, 2016).

Los tratamientos químicos más utilizados para el tratamiento de aguas de producción y sus principales características, se encuentran en la tabla 11.

**Tabla 11**

*Métodos químicos para el tratamiento de agua*

Método Químico	Contaminantes Removidos	Características
Precipitación Química	Componentes iónicos, metales pesados, sólidos suspendidos.	Procesos de coagulación y floculación, usado principalmente para eliminar componentes iónicos, agregando contra-iones para disminuir su solubilidad (Oncel et al., 2013; Xiao et al., 2005). Se debe realizar en un ambiente controlado.
Oxidación Química	Compuestos orgánicos, hidrocarburos, color, olor, compuestos refractarios.	Se realiza mediante el uso de un agente oxidante, rayos UV y un catalizador (Renou et al., 2008; Shamma et al., 2005; Jiménez et al., 2018; Shokrollahzadeh et al., 2012). Es eficiente en el tratamiento de aguas de producción para

---

		reducir hidrocarburos, colores y olores no deseados, material orgánico, etc.
		Amigable con el medio ambiente y rentable para la industria. Los procesos electroquímicos más conocidos son la electrodeposición, la electrocoagulación, la electro-flotación y la electro-oxidación (Muddemann et al., 2019; Jiménez et al., 2018; Gilpavas, 2008). Su eficiencia de remoción puede alcanzar hasta un 90 %.
Procesos electroquímicos	Materia disuelta, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO).	
Tratamiento Foto-catalítico	DQO, petróleo disperso.	Eliminación de los contaminantes mediante radiación solar ultravioleta y catalizadores, con el fin de formar radicales hidroxilos, generan un efecto oxidante sobre los contaminantes químicos. (Garcés Giraldo, L. F., Mejía Franco, E. A. y Santamaría Arango, J. J., 2004).
Fenton	DQO, petróleo disperso.	La adición de sales de hierro como agente catalizador que actúe en presencia del peróxido de hidrógeno, se conoce como reactivo Fenton, generan uno de los agentes oxidantes más potentes a pH ácidos (Garcés Giraldo, L. F., Mejía Franco, E. A. y Santamaría Arango, J. J., 2004). Se pueden lograr eficiencias del 95%.

---

---

Ozono	BTEX, orgánicos.	químicos	<p>Los átomos de oxígeno se introducen dentro de los compuestos, resultando en moléculas más pequeñas con un mayor porcentaje de oxígeno en su estructura química en forma de grupos funcionales hidroxilo, carboxilo o aldehído (Gong y Zhao, 2017; Alvares et al., 2001). Es un método muy costoso.</p>
Demulsificantes	Petróleo disperso		<p>Su objetivo es eliminar las emulsiones que mantienen atrapadas las partículas de aceite, requiere el uso de aditivos químicos para la demulsificación (Abdurahman et al., 2007).</p>
Oxidación Avanzada	Contaminantes orgánicos e inorgánicos		<p>Tratamiento de aguas contaminadas con productos orgánicos. Son procesos que implican la formación de radicales hidroxilos altamente reactivos, debido a su alto potencial de oxidación. (Garcés Giraldo, L. F., Mejía Franco, E. A. y Santamaría Arango, J. J., 2004).</p>

---

**Nota.** En la tabla se muestran los métodos químicos usados para el tratamiento del agua producida por la industria de los hidrocarburos. Adaptado de Evaluación del manejo del agua en la extracción y producción de hidrocarburos con miras a la definición de alternativas de tratamiento y reúso (Camacho Triana, J. L., 2020).

### 3.9 Adsorción

Se trata de un proceso físico usado en el tratamiento y purificación de agua y gases. En él, las moléculas de una sustancia en fase líquida o gaseosa, entra en contacto con un compuesto adsorbente y se adhieren a la capa inter-facial del mismo. El proceso contrario se conoce como desorción. El material que es adsorbido se conoce como adsorbato y el compuesto generalmente sólido y poroso, que tiene la capacidad de retener otras sustancias en su superficie es el adsorbente. En resumen, la adsorción es el proceso en el que las moléculas de adsorbato penetran la fase sólida del adsorbente y se adhieren a él. El proceso también puede ser conocido como sorción, y sus componentes como, sorbente y sorbato (Ruthven, D. M., 1984).

Según las sustancias que estén presentes en el contacto, las fases que se pueden encontrar son: líquido-sólido, sólido-gas y líquido-gas. Como resultado de la adsorción y dependiendo del tipo de adsorción, se pueden encontrar: Las fuerzas de Van der Waals, presentes en la adsorción física o fisorción, y los procesos químicos, en la adsorción química o quimisorción. (Dąbrowski, A., 2001).

La diferencia entre la adsorción física y la adsorción química, radica en que, en la adsorción física intervienen fuerzas intermoleculares débiles, sucede a temperaturas bajas y es un proceso que puede ser monocapa y multicapa. Mientras tanto, la quimisorción o adsorción química se trata de un proceso de formación de un enlace químico entre el sorbato y la superficie del adsorbente, se producen en un rango de temperaturas altas, y es únicamente un proceso monocapa (Ruthven, D. M., 1984).

Las isothermas de adsorción son el concepto de la ciencia de la adsorción, mediante ellas se muestra la relación entre la cantidad de adsorbato por unidad de masa de adsorbente, además

muestra el equilibrio entre el material adsorbido y la concentración de la fase fluida a temperatura constante (Dąbrowski, A., 2001).

Las isotermas suministran la información necesaria para saber la distribución del adsorbato entre las fases sólida y líquida, la forma de adsorción (monocapa o multicapa) y la naturaleza superficial del adsorbente (homogénea o heterogénea), además permite saber si se trata de una fisisorción o una quimisorción. Por eso, el diseño de las isotermas, es de vital importancia para conocer la aplicabilidad práctica de los adsorbentes y así poder diseñar el sistema adsorbente-adsorbato correcto (Eda Gökırmak Söğüt, E. y Mehmet Gülcan, 2023).

Los modelos de isotermas más usados en la adsorción de contaminantes en aguas residuales de procesos petroquímicos son los modelos de Langmuir, Freundlich Y Temkin (Eda Gökırmak Söğüt y Mehmet Gülcan, 2023)

### ***3.9.1 Modelo de Langmuir***

Fue propuesto entre 1915 y 1918, es uno de los modelos más sencillos para estudiar la adsorción de moléculas sobre solidos microporosos. El modelo predice la cantidad adsorbida de un gas sobre una superficie, en función de la presión del fluido. El adsorbato forma una monocapa en la superficie, la adsorción es energéticamente equivalente y las moléculas son retenidas.

La cantidad adsorbida  $\theta$  de una molécula en solución sobre una superficie sólida a temperatura constante, es función de la concentración y presión. Se expresa con la siguiente ecuación:

$$\theta = \frac{KP}{1 + KP} \quad (1)$$

Donde  $K$  es la constante de equilibrio y  $P$  es la presión de un gas, líquido o molécula en solución (Carriazo, J. G., Saavedra, M. J. y Molina, M. F., 2010).

El modelo de isoterma de Langmuir plantea que la adsorción monocapa ocurre en una superficie homogénea. Para su uso en cálculos, la ecuación 2 se linealiza de la siguiente manera:

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_{max}kl} x \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_{max}} \quad (2)$$

Donde  $q_e$  es la capacidad de adsorción en equilibrio,  $q_{max}$  la capacidad máxima de adsorción (mg de adsorbato/g de adsorbente),  $kl$  es la constante de adsorción de Langmuir (L/mg) y  $C_e$  es la concentración en equilibrio del adsorbato (mg/L) (Mansoori, S. A. A., Reza, Z., Mohammad, H., Mohammad, M. S., Abolfazl, J., Sadegh, S., & Akbar, E., 2022).

La ausencia de interacción entre las moléculas de adsorbato es el supuesto principal del modelo de Langmuir.

### 3.9.2 Modelo de Freundlich

Es una ecuación empírica entre las concentraciones de soluto en la superficie del adsorbente y la concentración del soluto en el líquido. Se expresa matemáticamente con la ecuación 3:

$$q_e = K_F \cdot C_e^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

El modelo puede ser transformado de forma lineal usando la siguiente ecuación:

$$\log q_e = \frac{1}{q_{max}kl} x \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_{max}} \quad (4)$$

Donde  $K_F$  es la constante de Freundlich, parámetro de afinidad adsorbato-adsorbente,  $q_e$  es la capacidad de adsorción en equilibrio (mg/g), y  $C_e$  es la concentración en equilibrio (mg/L). Si  $1 < n < 10$ , la adsorción es favorable. Las constantes  $K_F$  y  $\frac{1}{n}$  representan la curvatura y la inclinación de la isoterma, la cual indica la capacidad de adsorción.

En el modelo de Freundlich los iones metálicos se acumulan infinitamente sobre la superficie del adsorbente y la energía disminuye logarítmicamente con la cobertura de la superficie del soluto (Salvado, A. D. P., Campanholi, L. B., Fonseca, J. M., Tarley, C. R. T., Caetano, J., & Dragunski, D. C. (2012) y (Nguyen, K. T., Ahmed, M. B., Mojiri, A., Huang, Y., Zhou, J. L., & Li, D., 2021).

### 3.9.3 Modelo de Temkin

El modelo muestra la interacción entre el adsorbente y el adsorbato, sin tener en cuenta las concentraciones presentes en solución, la energía de adsorción disminuye linealmente con la unión de moléculas en la superficie del adsorbente, además se caracteriza por una distribución uniforme de las energías de enlace (Piccin, J. S., Dotto, G. L., & Pinto, L. A. A., 2011). El modelo se describe con la ecuación 5.

$$q_e = n_T \cdot \ln(K_T) + n_T \cdot \ln(C_e) \quad (5)$$

Donde  $K_T$  es la constante de enlace de equilibrio de Temkin,  $q_e$  es la capacidad de adsorción en equilibrio, ( $C_e$ ) concentración del adsorbato en equilibrio y  $n_T$  es es la constante de equilibrio de la unión máxima de energía de enlace. Penedo Medina, M., Manals Cutiño, E. M., Vendrell Calzadilla, F., & Salas Tort, D., 2015).

### 3.10 Materiales adsorbentes usados en el tratamiento de aguas contaminadas

La adsorción es el método más usado para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con compuestos orgánicos e inorgánicos, debido a su alta efectividad y su bajo costo, se ha convertido en una gran alternativa de tratamiento rentable y amigable con el medio ambiente para el uso en industrias como la de los hidrocarburos.

En su mayoría, los materiales adsorbentes usados para el tratamiento de aguas contaminadas, se caracterizan por presentar una estructura altamente porosa, lo que resulta en un aumento en su área superficial y por lo tanto también un aumento en la velocidad de adsorción

Dependiendo del tipo de contaminante, se pueden usar diversos materiales adsorbentes, y estos se pueden dividir en convencionales y no convencionales. Dentro del primer grupo, se encuentran los carbones activados, zeolitas, arcillas, arenas, alúmina activada y nanocompuestos. Dentro de los adsorbentes no convencionales, se encuentran materiales producto del aprovechamiento de desechos agroindustriales o de la industria alimentaria, fruta, residuos vegetales y plantas (Valladares Cisneros, M. G., Valerio Cárdenas, C., De la Cruz Burelo, P. y Melgoza Alemán, R. M., 2016). En la tabla 12 se muestran algunos de los materiales adsorbentes usados para el tratamiento de aguas contaminadas en la industria de los hidrocarburos

**Tabla 12**

*Materiales adsorbentes.*

<b>Material Adsorbente</b>	<b>Características</b>
Carbón activado	El uso de los carbones activados es muy popular, debido a sus excelentes propiedades adsorbentes de materia orgánica e inorgánica,

---

gran área superficial, micro porosidad elevada y un relativo bajo costo (Podkoscielny Nieszporek, 2007; Figueredo et al., 1999). Su creciente demanda, ha ocasionado la búsqueda constante de formas de usar residuos agroindustriales como materia prima para la síntesis de los carbones, y así contribuir a un aprovechamiento de residuos y la creación de carbones activados sostenibles y eficaces en el tratamiento de agua contaminada (Sanchez, K., Colina, G., Pire, M., Diaz, A., Carrasquero, S., 2013).

#### Zeolitas

La zeolita es una roca compuesta de aluminio, silicio y oxígeno. Su alta porosidad natural, se debe a su estructura cristalina. Las zeolitas naturales tienen un tamaño de poro limitado y son hidrofílicas, es decir tienen afinidad por el agua. En el caso de las zeolitas sintéticas, presentan un comportamiento hidrofóbico, es decir que presentan afinidad por los compuestos orgánicos, con poca o ninguna afinidad por el agua, y pueden adsorber moléculas orgánicas de tamaño más pequeño que el de sus poros (Granada et al., 2006).

#### Alúmina activada

La alúmina activada es una forma porosa y adsorbente de la alúmina hidratada, se prepara calentando y deshidratando el hidróxido de aluminio. La alúmina activada es un material con muy buenas propiedades de adsorción, posee una gran área superficial y una alta capacidad para remover agua (Aguilera Gonzales, E. N., Ortiz Reyes, J. M., Sanchez Castro, M. E., 2013). La alúmina activada tiene la capacidad de adsorción selectiva de gas, vapor de agua y humedad en

---

---

	algunos líquidos, además se ha demostrado que elimina el flúor, el arsénico y el selenio (Aparna et al., 2004).
Polímeros y nano compuestos	Ideales para la remoción de benceno, tolueno, hidrocarburos, grasas y aceites. El uso de polímeros a base de polietileno tereftalato o poliestireno, alcanzas cifras de remoción de hasta 99% (Crini, 2005). Los nano compuestos, presentan una reducción del 50 % de los hidrocarburos emulsionados en los primeros 100 minutos después de haber entrado en contacto con el material (Villegas et al., 2017).

---

*Nota.* En la tabla se muestran algunos de los materiales adsorbentes usados para el tratamiento de aguas contaminadas en la industria de los hidrocarburos.

### 3.11 Carbón Activado

Usado como material adsorbente para la eliminación de contaminantes orgánicos presentes en el agua, gracias a su porosidad y superficie, el porcentaje de retención o adsorción de los carbones activados es muy alta, y representan una muy buena alternativa para el tratamiento de aguas contaminadas. La superficie de los carbonos puede ser de 500 a 1.400 metros cuadrados por gramo, las partículas de carbón granular que se crean por la activación, se encuentran en los poros de dimensiones moleculares y son los responsables de la adsorción, dependiendo del diámetro, una molécula penetrará o no el poro, cuanto más pequeño sea el poro respecto a la molécula mayores serán las fuerzas de atracción (Cornell, Howland, Hayes y Merryfield., 1973).

Después de su activación, el área superficial del carbón vegetal puede aumentar hasta 300 veces debido a sus poros. La clasificación de los poros según la IUPAC (International Union of

pure and Applied Chemists), según su tamaño son, macro porosa mayor a 50 nm, meso porosa de 2 a 50 nm y micro porosa menor a 2nm (Gallup et al., 1996). La tabla 13 muestra la clasificación de tamaño de poro según la IUPAC.

**Tabla 13**

*Clasificación IUPAC según tamaño de poro.*

<b>Tamaño de poro (Diámetro)</b>	<b>Clasificación según la IUPAC</b>
Mayor a 50 nm	Macro-poroso
De 2 a 50 nm	Meso-poroso
Menor a 2 nm	Micro-porosa

*Nota.* La tabla muestra la clasificación de tamaño de poro según la IUPAC. Adaptado de Materiales en adsorción y Catálisis (Rodríguez Reinoso, F. 2010).

El carbón activado es preparado artificialmente mediante procesos de carbonización, para aumentar su porosidad y alta superficie interna. Son preparados con materiales precursores con alto contenido de carbono, los materiales orgánicos como cascaras de semillas y frutos, carbón mineral, residuo agrícola, huesos, madera y coque son los materiales precursores más comunes (Luna, D., González, A., Gordon, M., y Martín, N., 2007).

Las fuerzas de Van Der Waals son las fuerzas de atracción presentes entre las moléculas de un compuesto y los átomos de la superficie de un carbón, dicho proceso representa la adsorción, la cual es proporcional al aumento de la superficie. El carbón activado posee una estructura cristalina como la del grafito, muy poroso y con áreas superficiales de más de 1500 metros cuadrados. La superficie de los átomos de carbones, puede atraer moléculas de compuestos que tienen olor, color o sabores indeseados. La activación de un carbón consiste en aumentar su área

superficial y crear una estructura porosa, la estructura atómica cambia dependiendo del tipo de carbón que se utilice (Sevilla, U. D., 2011).

### ***3.11.1 Activación del carbón***

El proceso consiste en deshidratar y carbonizar la materia prima, seguido de un proceso de activación. El exceso de agua debe eliminarse del material orgánico, convirtiéndose en carbón primario, que es una mezcla de cenizas, carbono amorfo, alquitranes y carbono cristalino resultante después de la carbonización. Existen dos tipos de activación en la fabricación del carbón, activación química y física (llamada térmica) (Luna, D., González, A., Gordon, M., & Martín, N., 2007).

#### **3.11.1.1 Activación Física.**

La porosidad se genera mediante la gasificación del material carbonizado a temperaturas elevadas. Se eliminan elementos como el hidrógeno (H) y el oxígeno (O) del precursor para dar lugar a la generación de la estructura carbonosa porosa. El carbón queda expuesto a una atmósfera oxidante de dióxido de carbono que elimina productos volátiles y átomos de carbono aumentando su porosidad (Luna, D., González, A., Gordon, M., y Martín, N., 2007).

Mediante la carbonización, se logra la deshidratación de la materia prima, durante este proceso los elementos no carbonosos como el hidrogeno y el oxígeno son eliminados mediante pirolisis y los átomos de carbono forman una estructura micro cristalina (cristalitos gráficas elementales) en donde los espacios entre estos micro cristales son ocupados por carbono amorfo, alquitranes y otros residuos. La etapa siguiente es la activación, en donde se aplican temperaturas entre 800 y 1100 grados centígrados, en presencia de un oxidante, el cual actúa como agente

activante, el cual puede ser vapor de agua o dióxido de carbono. De acuerdo al tamaño que se desea obtener, el material precursor debe ser sometido a un proceso de molienda y tamizado previo a la activación (Sevilla, U. D., 2011).

### **3.11.1.2 Activación Química.**

En este proceso, el carbón es impregnado por un agente químico que ayuda a reducir la formación de agentes volátiles y alquitranes, luego es calentado en un horno a temperaturas de 500 a 700 grados centígrados, por último, se tiene que lavar para eliminar los residuos del agente químico y neutralizar el pH. La porosidad se genera mediante la deshidratación química del carbón a temperaturas bajas (Luna, D., González, A., Gordon, M., y Martín, N., 2007)

En la activación química se crea una mezcla entre la materia prima y el agente activante, formando una pasta que luego se seca en un horno. Los agentes más utilizados son hidróxido de potasio (KOH), cloruro de zinc ( $ZnCl_2$ ) y ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ). El resultado final es una estructura porosa y una ampliación del área superficial. Los parámetros importantes a tener en cuenta son: relación de impregnación, temperatura de activación y el tiempo de residencia (Vayas, 2017).

### **3.11.2 Pirolisis**

La pirolisis se realiza en atmosferas inertes, usando gases como nitrógeno (N) o helio (He), obteniendo combustibles gaseosos, líquidos y sólidos. La pirolisis es un proceso de degradación térmica de la biomasa, en donde el material primario se transforma bajo la transferencia de calor y masa, se rompen enlaces químicos y se modifica su estructura (Gómez, A., Klose, W., y Rincón,

S., 2008). En el caso de este proyecto, se usó la descomposición térmica de la cascara de cacao, cuesco de palma y bagazo de caña como biomasa para la generación del carbón activado.

Al tratarse de un proceso termoquímico que se da en ausencia de oxígeno, cuenta con tres etapas: dosificación y alimentación de la materia prima, transformación de la masa orgánica y por último la separación de productos como coque, aceite y gas (Klug, M., 2012).

### **3.12 Biomasa Residual**

El aprovechamiento de los residuos provenientes de industrias como la alimentaria o la industria agrícola, desechos de fruta, residuos vegetales o plantas, representa una de las mayores alternativas de uso y disposición de desechos orgánicos y agroindustriales y su aplicación en actividades que generen nuevos materiales útiles y amigables con el medio ambiente (Patel, S., 2012). El uso de este tipo de residuos, especialmente las cascaras de las frutas, para el tratamiento y eliminación de contaminantes en el agua, se consolida como una potencial alternativa para la creación de materiales adsorbentes de bajo costo, disponibilidad, alta capacidad de adsorción y degradabilidad, siendo este último, el responsable de una disminución de los problemas en la disposición final después de realizar la adsorción (Valladares Cisneros, M. G., Valerio Cárdenas, C., De la Cruz Burelo, P. y Melgoza Alemán, R. M., 2016).

La disponibilidad de la biomasa residual varía según la región, dependiendo de factores como densidad poblacional, patrones de consumo o cadenas de valor económicas (Hamelin et al., 2019). Países como Colombia, que poseen una enorme biodiversidad en especies frutales y vegetales, son los mayores exponentes de actividades agroindustriales que diariamente producen grandes cantidades de residuos, restos de cosechas, paja, alimentos, estiércol, etc. (Losada, H. R, Rodríguez, L. L., Zorrilla, J. C. y Vargas, J. M., 2015).

El cultivo de caña de azúcar para la fabricación de panela representa un 62% de su uso total en el país, lo que significa que la producción de bagazo de caña como residuo principal de este cultivo alcanza grandes cantidades y aunque es generalmente usado como generador de combustión en calderas rudimentarias, su disposición final genera un efecto contaminante en el entorno (Fedepanela, 2021). En el sector agroindustrial de la caña, la cogeneración de energía se realiza principalmente a partir del uso de bagazo, residuo que es considerado como fuente no convencional de energía renovable y creación de materiales como carbones activados (Asocaña, 2024).

Con una producción aproximada de 2 millones de toneladas, Colombia se posiciona como el mayor productor de aceite de palma de Latinoamérica y cuarto en el mundo (Ministerio de Agricultura, 2019). Según reportes de Fedepalma, el sector palmero colombiano hace presencia en 21 de los 32 departamentos del país. El aceite de palma se obtiene de la parte pulposa de la fruta, usando procesos que generan subproductos como raquis (racimos vacíos), torta de palmiste, cuesco, fibra y efluentes (Caiza & Aguiar, 2021). La poca reutilización de estos subproductos o desechos provenientes del proceso productivo de la palma ocasiona una problemática ambiental, generando impactos en el agua, el suelo, el aire y la biodiversidad. (Pitto & Carvajal, 2017). Anualmente se generan más de 300 mil toneladas de cuesco, cuyo peso puede alcanzar hasta 12 % del fruto de palma (Yuliusman, et al., 2016). En Colombia se reportan 4 kg de biomasa seca por cada kg de aceite de palma producido (Rashidi, N. A. y Yusup, S., 2017), lo que equivale a una producción de 6,5 millones de toneladas de biomasa, de las cuales el cuesco representa entre 0,13 y 0,4 toneladas por tonelada de aceite crudo (Van Dam, J., 2016). Según estas cifras, en Colombia se generan entre 211 mil y 651 mil toneladas de cuesco de palma de aceite al año (Alvarez Villanueva, D. M., 2019).

Uno de los principales productos cultivados en Colombia, es el Cacao, catalogando al país como el noveno productor a nivel mundial y cuarto en América Latina, en donde actualmente son usadas cerca de 800 mil hectáreas para su cultivo. El constante aumento en la producción de Cacao, también genera un aumento en la generación de residuos derivados del proceso, residuos como cáscara, mucílago, ramas, hojas, etc. (Salcedo Puerto, O., Mendoza Martinez, C. y Vakkilainen, E., 2025). En el proceso de producción del Cacao se produce un 90% de residuos con respecto al peso fresco total del fruto (Sangronis, H., 2008). De los granos de cacao se aprovecha aproximadamente el 85% para su industrialización, el 15% es considerado desecho y de este último, el 12% es cascarilla de cacao (Flórez L. 2016). Mundialmente, se producen 700.000 toneladas de cascarillas de cacao al año (Navarro O, 2017).

La incorrecta disposición de los residuos derivados de actividades agrícolas, puede generar la emisión de olores, gases de efecto invernadero, proliferación de moscas o ratas, emisiones contaminantes o pérdida de bioenergía (Acevedo et al., 2021). Por eso, la búsqueda constante de métodos de aprovechamiento y tratamiento de la biomasa residual para el uso de sus propiedades y potencial energético, se convierten en necesidades obligatorias de las industrias, en búsqueda de una economía circular y una producción sostenible. A pesar de sus múltiples ventajas, la implementación del uso de biomasa residual se enfrenta a la falta de información acerca de su tratamiento y requiere la implementación de tecnologías específicas para cada tipo de residuo.

Este proyecto pretende brindar un aporte para los estudios acerca del uso de biomasa residual vegetal en la creación de carbones activados para la adsorción de contaminantes en el agua resultante de actividades petroleras, centrándose en los cultivos con mayor predominancia en el departamento de Santander, bagazo de caña, cáscara de cacao y cuesco de palma. Brindando la

información necesaria para su implementación como materia prima, aprovechando sus propiedades, aplicación y potencial energético.

### **3.13 Transición energética y economía circular**

En la actualidad, empresas de todo el mundo entienden que para garantizar el futuro de sus negocios es necesario pasar de los enfoques lineales a los circulares (Henzen, R., & Weenk, E., 2022). Los recursos naturales son finitos, lo que significa que, con el tiempo, serán cada vez más difíciles y costosos de obtener. Por eso, es casi obligatorio, la implementación de tecnologías y modelos de negocio que ayuden a las empresas a reducir, reutilizar y convertir su cadena productiva en procesos de bajo impacto ambiental (Henzen, R., & Weenk, E., 2022).

La economía circular es una estrategia que busca un equilibrio entre la generación de prosperidad económica, protección del medio ambiente y prevención de la contaminación (Prieto et al., 2017). Hace algunos años, se usó el término desarrollo sostenible como alternativa para combatir la acelerada degradación de los recursos naturales, definido como la satisfacción de las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las generaciones del futuro (Brundtland, 1987). Sin embargo, el concepto no es posible de aplicar si se sigue trabajando en base a modelos económicos lineales. La aplicación de un modelo circular, implica compartir, alquilar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales y productos existentes todas las veces que sea posible, generando así un valor añadido para cada producto y logrando que el ciclo de vida de los productos se extienda (Duch Guillot, J., 2023).

Con este fin, en Colombia se implementa la Ley de Gestión Integral de Residuos con enfoque de economía circular. Además, se formula la Política Nacional de Producción y Consumo Responsable y se estructuran proyectos estratégicos regionales para el desarrollo de la

infraestructura de gestión de residuos (Plan Nacional de Desarrollo, 2022). Priorizando la aplicación de políticas que buscan promover un uso eficiente de los recursos, que incorporará los materiales recuperados en nuevas cadenas de valor y reducirá su disposición final (Ecopetrol, 2024).

## 4. Metodología

### 4.1 Materiales y métodos

A continuación, se describen los equipos, materiales y procedimientos usados para el desarrollo de la metodología experimental de este proyecto de investigación.

#### 4.1.1 Reactivos y equipos de laboratorio

Los equipos que se utilizaron fueron suministrados por el parque Tecnológico Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander. En el laboratorio del Grupo de investigaciones en corrosión (GIC). Los materiales se describen en las tablas 14 y 15.

**Tabla 14**

*Reactivos y materiales usados en la investigación.*

Nombre reactivo	Especificaciones
Biomasa	Cuesco de palma (Santander, Colombia)
	Bagazo de caña (Santander, Colombia)
	Cascara de café (Santander, Colombia)
Reactivos	Ácido fosfórico, Pureza 95% (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> , Merck KGaA, Alemania)
	Azul de metileno, 99%, (Sigma-Aldrich)
	Sulfato de plata, 99%, (Sigma-Aldrich)
	Dicromato de potasio, 99%, (Sigma-Aldrich)

**Nota.** En la tabla se describen los materiales y reactivos usados para el desarrollo experimental de este proyecto junto a sus especificaciones.

**Tabla 15**

*Equipos usados para el desarrollo de la investigación.*

<b>Equipos de laboratorio</b>	<b>Especificaciones</b>
Espectrofotómetro UV-Vis	Genesys 180 (Thermo Fisher Scientific© , EE.UU)
Centrifuga	EBA 21 (Andreas Hettich GmbH y Co.KG©, Alemania)
Horno carbolite	UN 110 (Carbolite Gero Ltd©, Reino Unido)
pHmetro	Hach sensION 3 Benchtop® (Hach©, EE.UU.
Espectrofotómetro FTIR	Nicolet Summit X FTIR Thermo Scientific® (Thermo Fisher Scientific©, EE.UU.)
Agitador orbital	MaxQ 2000 CO2 Thermo Scientific® (Thermo Fisher Scientific©, EE.UU.)
Balanza analítica	Precisa XB 220A
Agitador magnético	Velp Scientifica AREC

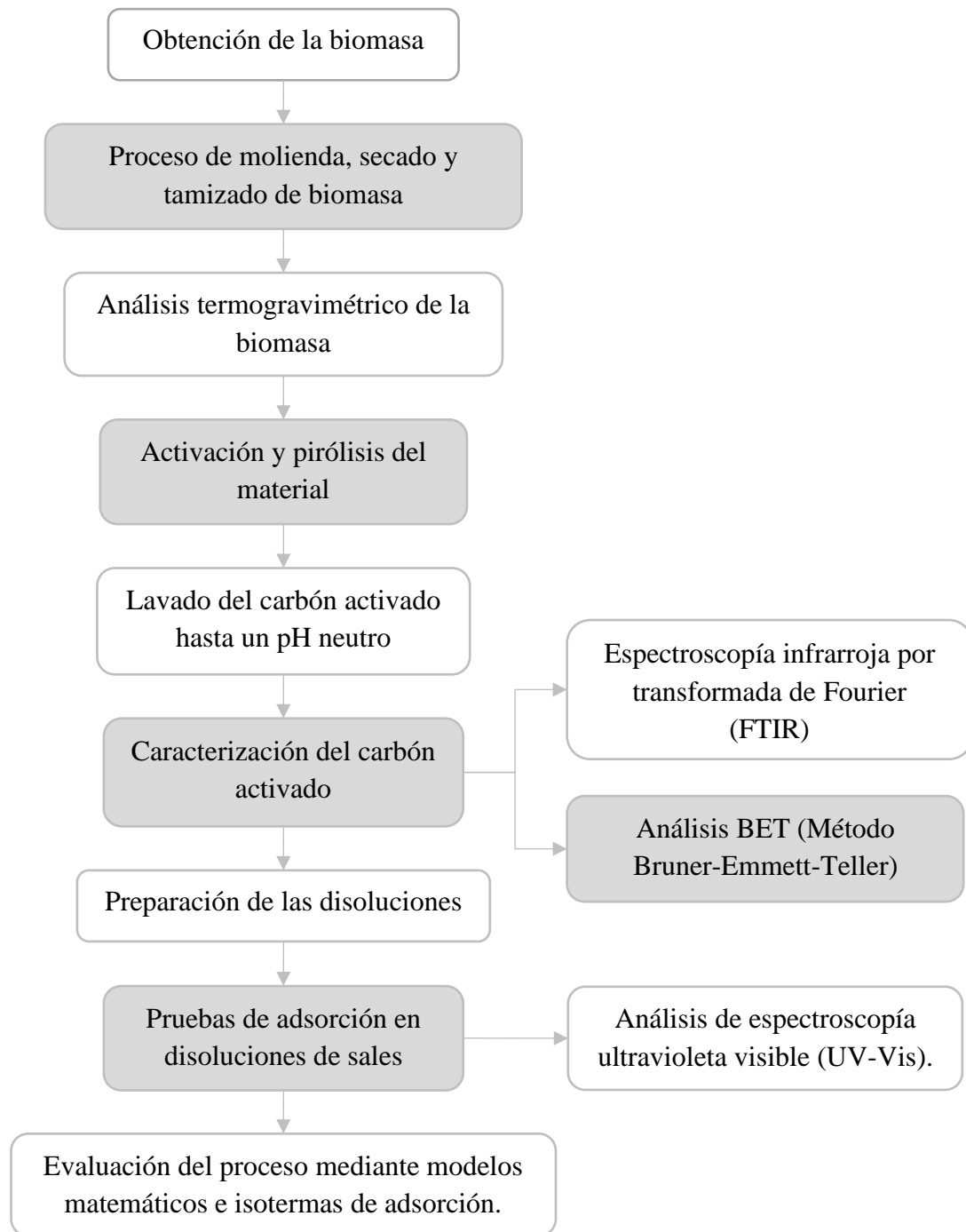
*Nota.* Esta tabla muestra la lista de equipos usados para el desarrollo experimental de esta investigación.

## **4.2 Procedimiento experimental**

Basado en estudios realizados por León et al., (2023), esta investigación describe la eficiencia de adsorción de carbones activados para la eliminación de sales orgánicas e inorgánicas en aguas contaminadas. El proceso experimental se describe en la figura 5.

**Figura 5**

Diagrama de flujo experimental del proyecto



**Nota.** El gráfico presenta un diagrama de flujo del proceso experimental realizado para el desarrollo de este proyecto de investigación.

#### ***4.2.1 Selección y preparación de la biomasa***

Se seleccionó biomasa residual vegetal proveniente de actividades agrícolas del departamento de Santander. En esta actividad se consideró la cáscara de cacao, bagazo de caña y cuesco de palma como material precursor para la elaboración de carbones activados.

Las biomásas fueron sometidas a un proceso de molienda, donde se obtuvieron diferentes tamaños de partículas, seguido por un proceso de secado al sol por 72 horas (secado natural). Luego el material seco se separó mediante tamizado en un equipo Tamiz Grand Test – Pinzuar ©. Seleccionando partículas con un número de malla 40 – 50 mesh. A continuación, se llevó a secado en un horno Carbolite UN 110® a 105°C durante 8 horas para luego pesar el resultado, este proceso se repitió hasta que el peso de la muestra fuera constante. La muestra se llevó a secado a 110°C durante 8 horas, por último, se enfrió en un desecador y se pesó nuevamente para que estuviera lista para el proceso de activación.

#### ***4.2.2 Análisis Termogravimétrico***

Previo al proceso de la pirolisis, es necesario conocer acerca de los niveles o intervalos de temperatura y velocidad de calentamiento adecuados para favorecer la obtención de los productos sólidos y líquidos de la etapa de pirolisis y, de esta manera asegurar un desarrollo favorable del proceso térmico. Una alternativa es el estudio del proceso de descomposición térmica de la biomasa mediante análisis termogravimétrico (Cutíño et al., 2011).

En este proyecto la descomposición térmica se realizó con 10 mg de cada una de las biomásas obtenidas de cáscara de cacao, cuesco de palma y bagazo de caña previamente secadas, ubicándolas en un crisol de Platino HT, el cual se colocó en el equipo TA INSTRUMENTS serie

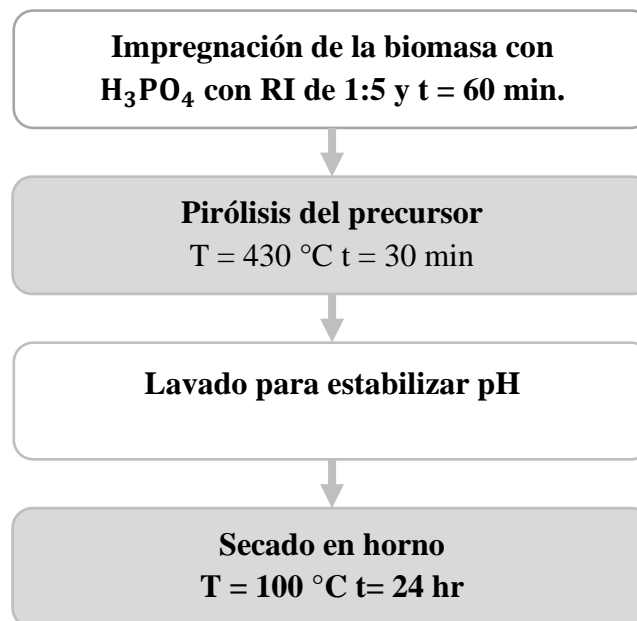
5500®. Con ayuda del software TRIOS® (TA Instruments®, EE.UU.) se determinó la información de la pérdida en peso en un intervalo de temperatura entre 30 a 950 °C a una velocidad de calentamiento de 10°C/min y bajo atmósfera de nitrógeno (N<sub>2</sub>).

#### 4.2.3 Activación del carbón

Para la activación de los carbones activados se utilizó la metodología planteada por León et al. (2023), el proceso se describe en la figura 6. Las biomásas de cáscara de cacao, hueso de palma y bagazo de caña fueron activadas utilizando ácido fosfórico  $H_3PO_4$  al 95 %, considerando una relación de impregnación de 1,5, un tiempo de reacción de 1 hora.

#### Figura 6

Diagrama de flujo del proceso de activación del carbón



*Nota.* El gráfico representa gráficamente un paso a paso del proceso realizado para la activación del carbón usado para este trabajo.

Luego del proceso de impregnación, la mezcla de biomasa con ácido fosfórico se dejó en el horno por un tiempo de 8 horas a 150 °C, con la finalidad de remover la mayor cantidad posible de humedad. Posteriormente el proceso termoquímico de las muestras se llevó a cabo por pirolisis, en una atmosfera inerte con nitrógeno (N<sub>2</sub>) a una temperatura de reactor de 430°C, durante 30 min de reacción. Por último, las muestras de los carbones activados pasaron por un proceso de lavado y filtrado donde se utiliza un separador al vacío, papel filtro y agua destilada. Este procedimiento se realiza hasta alcanzar un pH neutro entre 6 a 7.

#### ***4.2.4 Caracterización del carbón***

**4.2.4.1 Espectroscopia FTIR.** Las muestras se analizan mediante espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR-ATR) para identificar grupos funcionales. Los resultados de esta técnica permiten obtener información valiosa sobre los cambios estructurales entre las biomásas residuales vegetales y sus carbones activados (Mata-Miranda, M. M., et al. 2017).

Los espectros analizados se obtuvieron usando el 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 trabajaron a temperatura ambiente (25 °C), las pruebas se realizaron en el rango espectral entre los 400 y 4.000 cm<sup>-1</sup> y 32 scans, con el fin de determinar cualitativamente la presencia de los grupos funcionales de cada uno de los compuestos analizados.

**4.2.4.2 Análisis de área superficial específica BET.** Para determinar el área superficial y volumen de poro de las muestras, se aplicó el método de Brunauer, Emmett y Teller o análisis

BET. Las muestras se pesaron en celdas de 9 mm de diámetro fabricadas en vidrio borosilicato Micromeritics®. La etapa de desgasificación se hizo a una temperatura de 200 °C y una presión de vacío de 6 Pa durante 8 horas, usando aproximadamente una masa de 0,1000 g en la unidad Vac Prep 061 Micromeritics®. La captura de las isothermas de adsorción de nitrógeno se realizó a 77 K (-196 °C) en un equipo 3FLEXTM de Micromeritics®, en un intervalo de presión relativa (P/P0) entre 0,0025 y 0,9999. El análisis de los datos fue realizado con el programa 3FLEX V.4.03®, suministrado por el Centro de Investigaciones en Catálisis de la Universidad Industrial de Santander en el parque tecnológico de Guatigará.

#### ***4.2.5 Preparación de las disoluciones***

Este proyecto de investigación evaluó la eficiencia de adsorción de los carbones activados para la remoción de sales orgánicas e inorgánicas presentes en aguas residuales de aguas petroleras. Para esto se usaron muestras representativas para la preparación de aguas sintéticas tales como azul de metileno ( $C_{16}H_{18}ClN_3S$ ), dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) y sulfato de plata ( $Ag_2SO_4$ ), evaluando cada uno a diferentes concentraciones en miligramos por litro (mg/L) o parte por millón (ppm). Las concentraciones de las sales orgánicas e inorgánicas fueron seleccionadas considerando valores cercanos a las concentraciones presentes en aguas residuales de actividades petroleras a escala de campo. Durante la preparación de las soluciones se utilizó un agitador magnético Velp Scientifica AREC.

#### ***4.2.6 Determinación de la adsorción del carbón activado mediante análisis por espectroscopia UV-Vis***

Se realizaron pruebas de adsorción en diferentes soluciones de azul de metileno, dicromato de potasio y sulfato de plata con concentraciones entre 50 y 250 mg/L. Se añadió 0,1 g de carbón activado a 10 ml de cada solución en tubos de ensayo falcón de 15 ml previamente sellados. Posteriormente, estos tubos se agitaron en un agitador orbital MaxQ 2000  $CO_2$ , a 150 rpm, durante 24 h (tiempo estimado para alcanzar el equilibrio). Luego se separó el carbón activado por centrifugación en un equipo EBA 21 a 6000 rpm durante 20 min para separar el sólido de la disolución. La concentración final de azul de metileno, dicromato de potasio y sulfato de plata se determinó a partir del líquido sobrenadante. Las curvas de calibración de cada sal se estimaron en un espectrofotómetro UV-Vis Genesys 180 (Thermo Fisher Scientific©, EE. UU), en un rango de longitud de onda ( $\lambda$ ) entre 190 y 800 nm, usando soluciones en el rango de 5 a 50 mg/L. Las concentraciones preparadas y su curva de calibración se aplicaron con la finalidad de determinar experimentalmente la relación entre la concentración inicial y la concentración final obtenida luego de la interacción de las sales y el carbón activado durante el proceso de adsorción. El ajuste a las correlaciones de calibración se realizó con el método de Beer-Lambert.

La espectroscopia UV-Vis es una técnica de medición basada en la absorción de radiación UV y/o visible por parte de las moléculas que componen a una sustancia. Esta espectroscopia de UV-VIS se trabaja en un intervalo de longitud de onda de 200 a 800 nm, brindando información de los estados energéticos, atómicos o moleculares de la muestra de estudio (Cubas et al., 2018). La espectroscopia UV-Vis a través del estudio de la posición e intensidad de las bandas de absorción, brinda información sobre transiciones electrónicas del sistema molecular, lo cual permite determinar parámetros de interés como: Rango de longitudes de onda de absorción y coeficiente de absorción molar (Baron Leon, M. M., & Comas Toscano, S. M. (2016)).

A partir de la ley de Lambert-Beer se determinó la eficiencia de adsorción, la cual establece una relación entre la absorbancia y la concentración. Para determinar la capacidad de adsorción se utiliza la ecuación 6.

$$q_e = \left( \frac{C_o - C_f}{W} \right) V \quad (6)$$

Donde  $q_e$  (mg/g) es la capacidad de adsorción,  $C_o$  es la concentración inicial de la disolución (mg/L),  $C_f$  es la concentración final de la disolución (mg/L),  $W$  es la masa de carbón(g) y  $V$  es el volumen de disolución (L). Adicionalmente, se calculó el porcentaje de remoción (%RE) con base a los resultados obtenidos de las concentraciones determinadas en el espectro UV-VIS usando la ecuación 7.

$$RE = \left( \frac{C_o - C_f}{C_o} \right) 100\% \quad (7)$$

## 5. Análisis de resultados

### 5.1 Análisis termogravimétrico de la biomasa

La caracterización de la biomasa residual vegetal se realizó mediante un análisis termogravimétrico (TGA), y la descomposición térmica se estableció para la cáscara de cacao, bagazo de caña y cuesco de palma, usando un rango de temperatura desde 30 °C hasta 950 °C. En este amplio intervalo de temperatura se presentan diferentes etapas de degradación de cada material, reflejado como pérdida de masa a diferentes ratas de calentamiento.

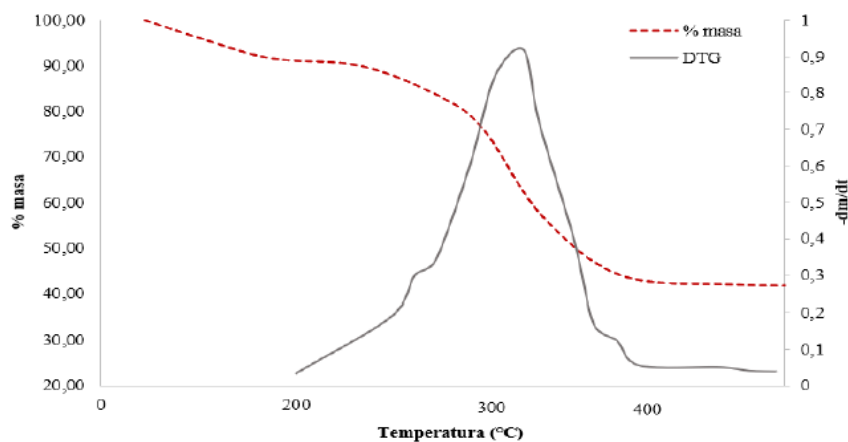
Según Collard, F. X. y Blin. J. (2014), la conversión principal de celulosa se produce entre 300 y 390 °C, con una velocidad de descomposición máxima generalmente comprendida entre 330 y 370 °C. La hemicelulosa muestra que su conversión ocurre principalmente en el rango de temperatura de 200 y 350°C. Dada la variedad de las funciones químicas que difieren en la estabilidad térmica, la principal etapa de conversión de la lignina ocurre en un amplio rango de temperaturas de 200 a 450 °C, con una tasa de descomposición más alta generalmente en el intervalo de temperatura comprendido entre 360 y 400 °C.

En la Figura 7 se muestran los resultados obtenidos de los análisis TGA de la biomasa de cáscara de cacao. Se puede observar un gradiente de pérdida de peso en masa del 11% en peso entre 40 y 200°C debido a la humedad. La mayor pérdida de masa se obtuvo aproximadamente en el intervalo de 300 a 380 °C, donde es posible evidenciar la pirolisis de la biomasa con la pérdida de la mayoría de sus componentes lignocelulósicos. El pico del DTG confirma que la temperatura donde sucede la mayor pérdida de muestra posiblemente por la descomposición de la celulosa y hemicelulosa se presenta alrededor de los 350 °C. La pérdida de masa acumulada es de alrededor

del 60 % en peso a los 600°C teniendo un alto porcentaje de material carbonoso o ceniza de alrededor del 40 % en peso, que son compuestos que no se lograron descomponer a las condiciones térmicas establecidas por la técnica. Entre tanto, a partir de los resultados es posible deducir que existe una pérdida de masa con el aumento de la temperatura.

### Figura 7

*TGA de la cáscara de cacao*



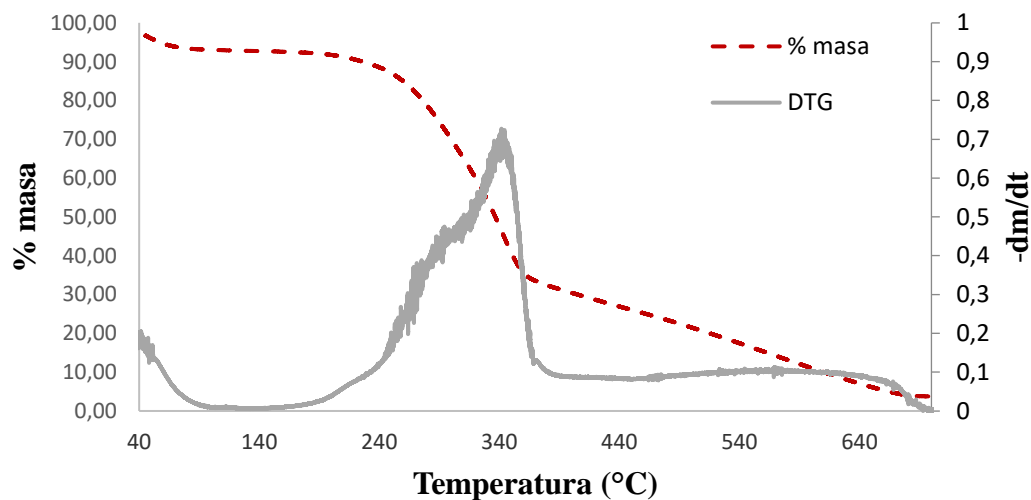
**Nota.** El gráfico muestra los resultados obtenidos en el análisis termogravimétrico de la cáscara de cacao.

Estas tendencias son similares a los resultados reportados por autores como (Torres Cabezas, M. (2019); Adjin-Tetteh et al., (2018); Reddy et al. (2017); Muñoz, Prieto-García, Méndez, Sandoval, & Laguna, (2016); Joe et al. 2017; Cay et al.2018), quienes determinaron que la hemicelulosa, la celulosa y la lignina se descomponen en el rango de temperatura entre 100 a 250 °C, 250 a 360 °C y de 360 a 700°C, respectivamente.

En la Figura 8 se muestran los resultados obtenidos de los análisis TGA de la biomasa de bagazo de caña. El primer gradiente de pérdida de peso en masa es del 9% entre 40 y 120°C debido a la humedad y componentes altamente volátiles. La mayor pérdida de masa se obtuvo aproximadamente en el intervalo de temperatura entre los 240 y 370 °C, así mismo se define el intervalo de pirolisis, la descomposición de hemicelulosa y celulosa. El DTG nos muestra un pico a los 340°C correspondiente a la descomposición de celulosa. Los resultados muestran que, en el rango de 360 a 700°C, hay un gradiente de pérdida de masa es del 29 % en peso, alcanzando una pérdida de peso acumulada máxima del 97 % alrededor de los 700 °C y un porcentaje de ceniza de un 3%. (Cutíño et al., 2011).

### Figura 8

*TGA del bagazo de caña*

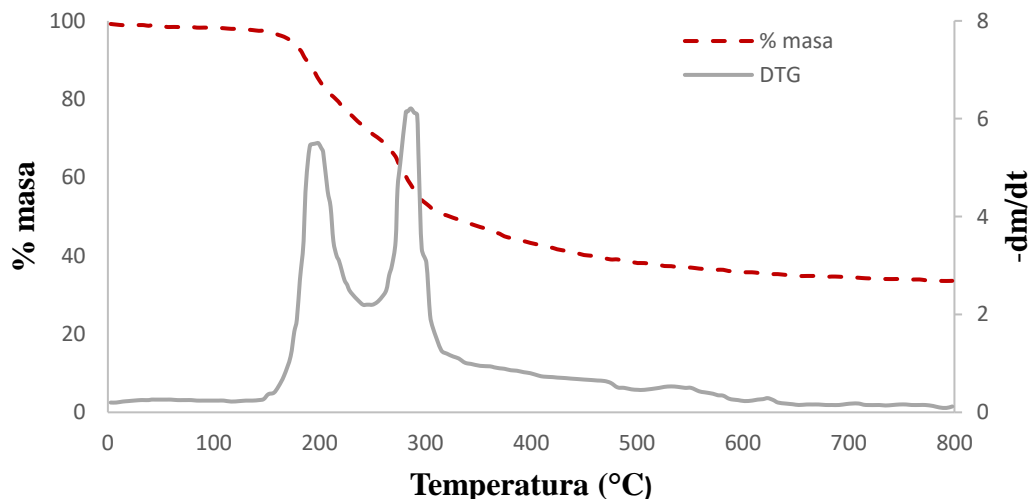


*Nota.* El gráfico muestra los resultados obtenidos en el análisis termogravimétrico del bagazo de caña.

En la Figura 9 se muestran los resultados obtenidos de los análisis TGA de la biomasa de cuesco de palma. Los dos picos se deben a la descomposición de hemicelulosa (eliminación de extractivos orgánicos) y celulosa. El primer pico de 150 a 250 °C y el segundo pico de 250 a 400 °C. La mayor pérdida de masa de 40% se obtuvo aproximadamente a los 290 °C. El primer pico podría estar asociado con la evaporación de pequeños mono-fenoles, o con la descomposición de lignina y polisacáridos que llevan a la formación de productos como H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> y ácido acético. El segundo pico parece ser la pirolisis o evaporación de grandes moléculas como ácidos grasos, fitosteroles y derivados de fitosteroles García, J. A., García, M., & Das, K. C. (2008). Finalmente se obtuvo una pérdida de peso acumulada máxima del 68 % alrededor de los 700 °C y un porcentaje de ceniza de un 33,3%.

### Figura 9

*TGA del cuesco de palma*



**Nota.** El gráfico muestra los resultados obtenidos en el análisis termogravimétrico del cuesco de palma.

Con base en los resultados del TGA se puede indicar que la temperatura apropiada para el proceso de pirolisis y preparación de los carbones activados a partir de las tres biomásas se puede establecer para temperaturas superiores a los 430 °C, con la finalidad de garantizar la eliminación de compuestos volátiles y crear materiales carbonosos.

## 5.2 Rendimiento del proceso de pirolisis

Para la activación de los carbones activados se utilizó un pirolizador tubular con inyección continua de  $N_2$  para asegurar condiciones inertes de reacción. Para cada ensayo de pirolisis se utilizaron cáscara de cacao, bagazo de caña y cuesco de palma previamente activados con ácido fosfórico. Las temperaturas de reacción se basaron en los resultados previamente dados en las pruebas de análisis termogravimétrico. A continuación, las muestras se sometieron a un lavado con agua destilada hasta alcanzar un pH en el rango de 6 a 7. Para el proceso de secado, las muestras se ingresaron en un horno a una temperatura de 100°C, durante 24 h. El rendimiento del carbón se calculó usando la ecuación 8.

$$\% \text{ Carbón activado} = \left( \frac{m_f}{m_i} \right) 100\% \quad (8)$$

Donde  $m_f$  es la masa del producto final después de la reacción,  $m_i$  es la masa inicial de la muestra impregnada y % Carbón activado es el porcentaje o rendimiento en peso de carbón activado después de la reacción. En la tabla 16 se muestran los resultados obtenidos durante el proceso de pirolisis.

**Tabla 16***Rendimiento del proceso de pirolisis para cada biomasa*

<b>Carbón activado</b>	<b>Masa inicial(g)</b>	<b>Masa final(g)</b>	<b>Rendimiento (%)</b>
Cáscara de Cacao	387	172	44.4
Bagazo de caña	90	27	30.2
Cuesco de palma	60	31	51.6

*Nota.* En la tabla se muestran los resultados obtenidos durante el proceso de pirolisis, la masa inicial, la masa final y el porcentaje de rendimiento.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla anterior, y con la información del análisis TGA se puede indicar que los rendimientos de los carbones activados son consistentes a los valores esperados, en donde el rendimiento del carbón activado esta en el orden creciente del uso de biomasa residual vegetal de caña de azúcar < cáscara de cacao < cuesco de palma.

### **5.3 Caracterización de los carbones activados**

#### **5.3.1 Análisis del área superficial específica BET**

El área superficial y el volumen poroso de los carbones activados se determinó aplicando el método de Brunauer, Emmett y Teller (BET). La tabla 17 muestra los resultados obtenidos del análisis de las muestras de cascara de cacao, bagazo de caña y cuesco de palma.

**Tabla 17***Análisis BET de los carbones activados*

<b>Carbón activado</b>	<b>Volumen total, (<math>cm^3/g</math>)</b>	<b><math>A_{BET}</math>, (<math>m^2/g</math>)</b>	<b>Tamaño de poro, (nm)</b>
Cáscara de Cacao	0.6888	971	3.9
Bagazo de caña	0.1359	215	4.0
Cuesco de palma	0.1935	890	3.0

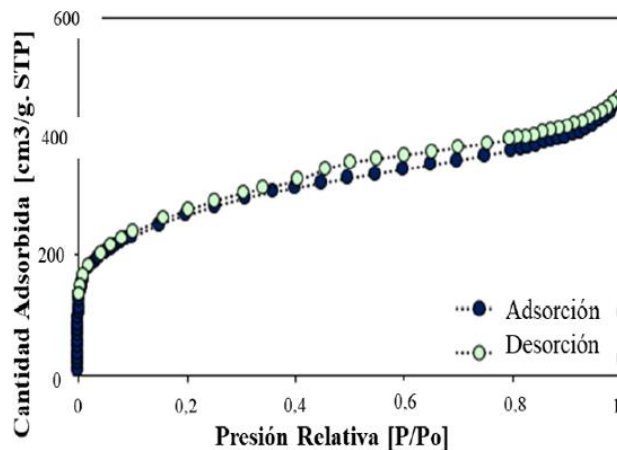
*Nota.* La tabla muestra los datos obtenidos para el análisis BET de los tres carbones activados utilizados.

Según la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry), los carbones se clasifican de acuerdo con el tamaño de poro como Macroporos (> 50 nm diámetro), Mesoporos (2-50 nm diámetro) y Microporos (< 2 nm diámetro) (Tabla 15). De esta manera, los resultados conseguidos indican que los carbones obtenidos se clasifican como mesoporosos. El carbón activado que mostro una mayor área superficial fue la cascara de cacao  $971 m^2/g$  seguido de cuesco de palma  $890 m^2/g$  y por último bagazo de caña  $215 m^2/g$ . El tamaño de poro no se puede considerar como inversamente proporcional al área superficial y volumen poroso. Ya que el carbón activado con menor tamaño de poro 3.0 nm de cuesco de palma no tiene la mayor área superficial. Esto se debe a la manera como se realizó el proceso desde la molienda hasta la activación y pirolisis, y también depende de la naturaleza química de los constituyentes de cada biomasa residual vegetal.

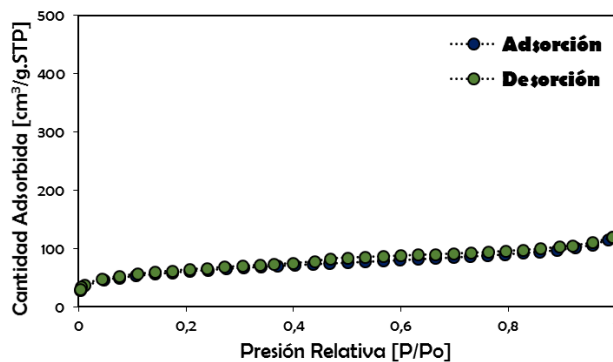
En la figura 10 se observan las isotermas de adsorción y desorción de los tres carbones activados.

**Figura 10**

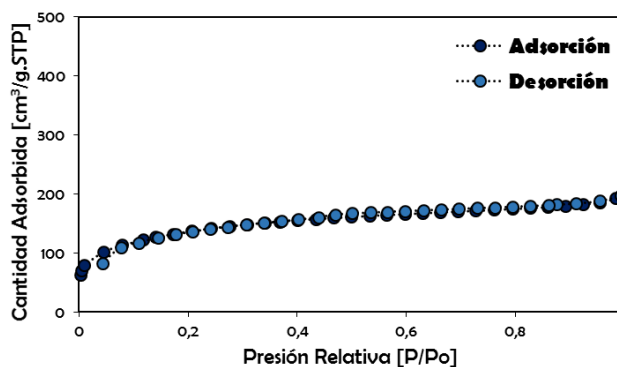
Curvas de adsorción/desorción de  $N_2$  de los carbones activados. (a) C.A cáscara de cacao, (b) C.A. bagazo de caña y (c) C.A. cuesco de palma.



**a**



**b**



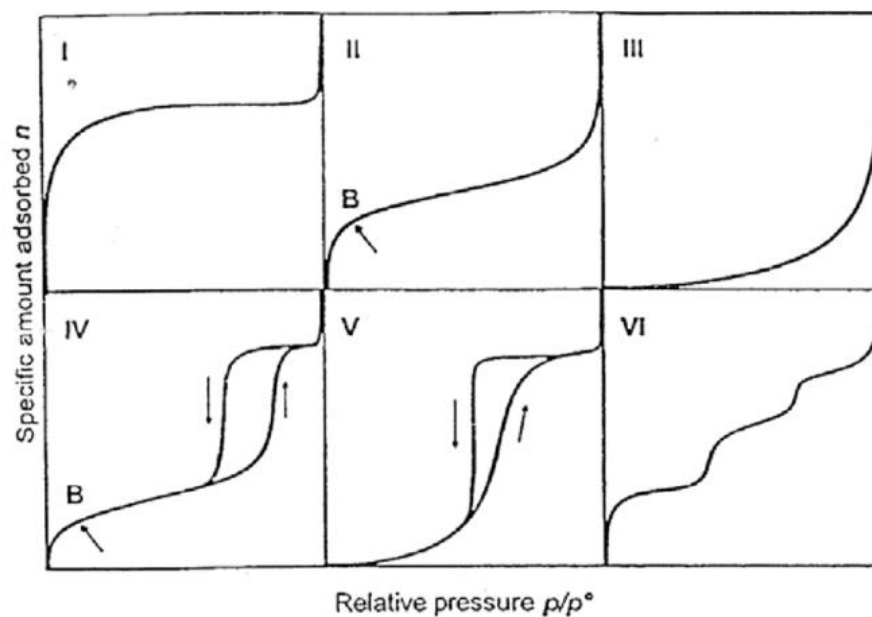
**c**

**Nota.** La figura presenta las curvas de adsorción y desorción de  $N_2$  para los tres tipos de carbones activados sintetizados.

Para clasificar y determinar el comportamiento de adsorción en las pruebas BET es muy común aplicar los seis tipos de isothermas establecidas por la unión internacional de química pura y aplicada IUPAC (figura 11). En este sentido, la tendencia de la isoterma tipo IV correspondiente a adsorción multicapa sobre material poroso y su ciclo de histéresis (la desorción no coincide con la adsorción), es la que más acorde esta con las obtenidas para los tres carbones activados. Esto a su vez confirma la presencia de mesoporos (Rodríguez F., 2010).

### Figura 11

*Retorno Tipos de isoterma de adsorción según la IUPAC*



*Nota.* El gráfico muestra la clasificación de isothermas recomendadas por la IUPAC. Tomado de *Aprovechamiento de residuos lignocelulósicos para producción de biocombustibles y bioproductos*, por Sing et al, 1988.

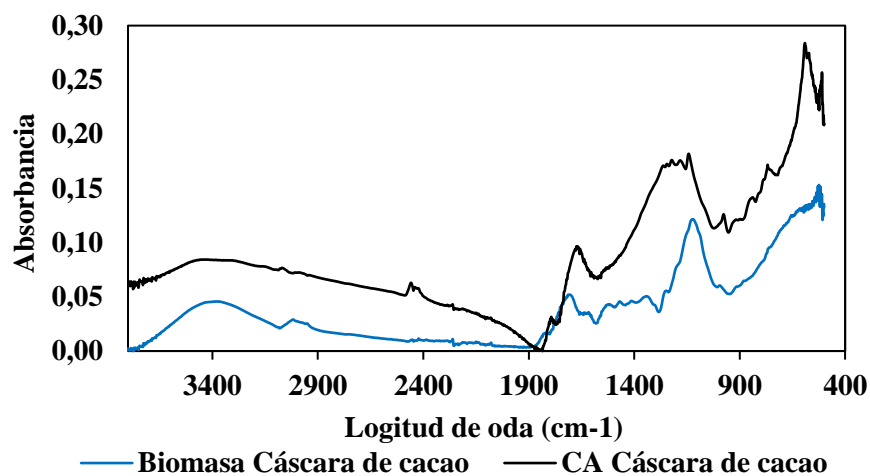
### 5.3.2 Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier FTIR

La caracterización de los tres carbones activados sintetizados en esta investigación se llevó a cabo mediante espectroscopia FTIR como lo indica la figura 12. Los resultados de los espectros proporcionan información única sobre los grupos funcionales presentes en la superficie de los carbones activados, y que, a su vez esta información permitirá relacionar su composición química con las propiedades y eficiencias de remoción de metales en las pruebas de adsorción (León, A. et al., 2023).

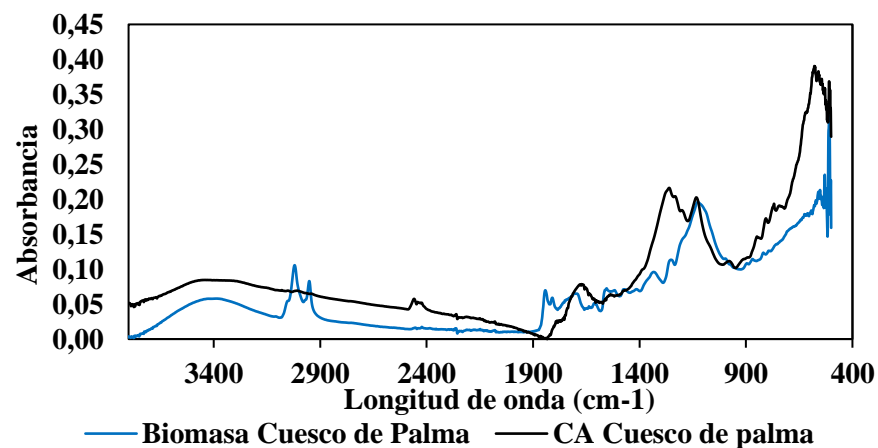
### Figura 12

*Espectros FTIR Absorbancia vs Longitud de onda (a) Biomasa y C.A. de cáscara de cacao, (b) Biomasa y C.A. de bagazo de caña y (c) Biomasa y C.A. de cuesco de palma.*

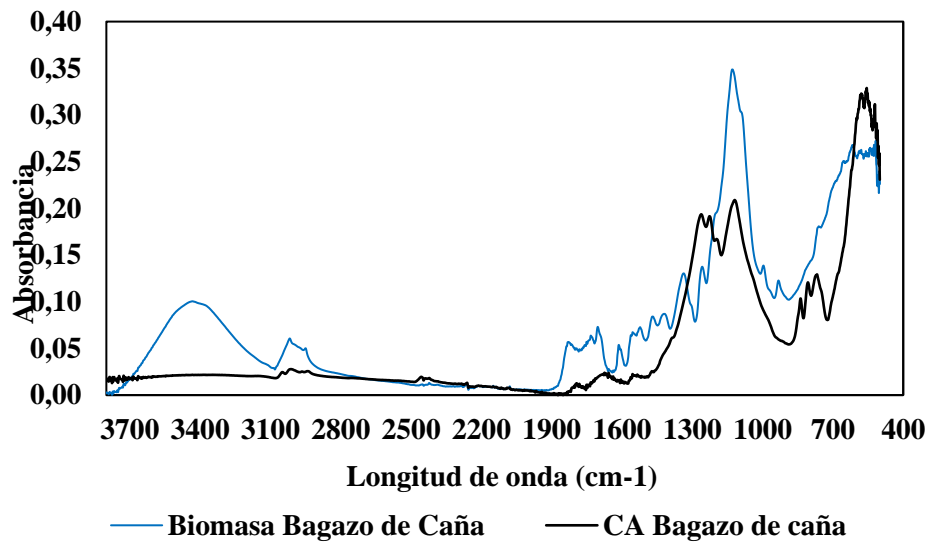
(a)



(b)



(c)



*Nota.* El gráfico presenta los espectros infrarrojos FTIR (Absorbancia vs Longitud) de los carbones activados de cáscara de cacao, bagazo de caña y hueso de palma y sus respectivas biomásas.

En la figura anterior se pueden evidenciar algunos grupos funcionales presentes en la estructura de los carbones activados considerando las intensidades por número de onda registrados.

Los resultados indican que las bandas anchas entre 3400 a 3100  $\text{cm}^{-1}$  se pueden asociar al grupo OH posiblemente por la presencia de fenol y compuestos con ácidos carboxílicos. Las bandas de estiramiento entre 1550 y 1650  $\text{cm}^{-1}$  corresponden principalmente al grupo C=O atribuidas a ácidos carboxílicos, pero la intensidad alrededor de 1630  $\text{cm}^{-1}$  también se puede asociar a estructuras aromáticas con enlaces -C=C-, las cuales pueden solaparse. Las intensidades entre 980 y 1200  $\text{cm}^{-1}$  pueden atribuirse posiblemente a especies como éteres como hidroxilos.

Los espectros muestran que existe una disminución principalmente en las intensidades asociadas al grupo metileno -CH<sub>2</sub>- alrededor de 1023  $\text{cm}^{-1}$ , y las vibraciones C-H de los grupos metilo, entre 1240 y 1400  $\text{cm}^{-1}$ . Además, se observan grandes reducciones de las intensidades de

las bandas entre 2840 a 2920  $\text{cm}^{-1}$ , típicas del estiramiento C-H alifático, y entre 1370 a 1470  $\text{cm}^{-1}$ , asociadas con la flexión C-H alifática. En forma generalizada, se puede observar que gran parte de los grupos funcionales característicos encontrados en las biomásas no se encuentran en los carbones activados obtenidos después del proceso termoquímico a 430°C. Además, los espectros FTIR-ATR muestran que, aunque las biomásas presentan similitudes, sus intensidades en ciertas longitudes de onda varían. Por tanto, estas variaciones en la composición química y bajo las mismas condiciones termoquímicas producen diferentes efectos en la estructura de los carbones activados. Estos datos coinciden con los resultados reportados en la literatura (Fuente et al., 2003; León, A. et al., 2021; Nandiyanto et al., 2019).

#### **5.4 Determinación de la adsorción de carbón activado por espectroscopia UV-Vis**

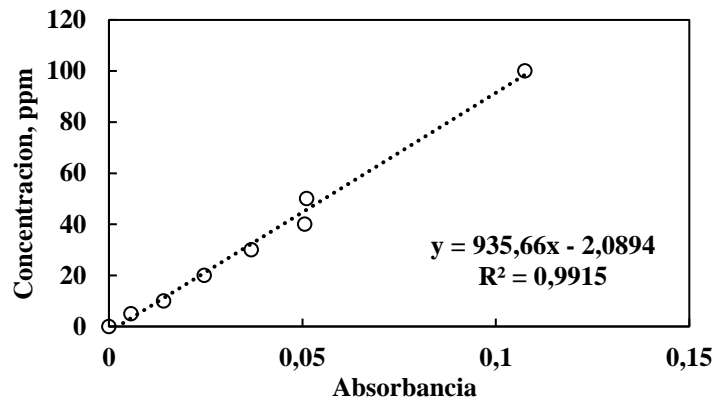
##### ***5.4.1 Ajuste de las curvas de calibración***

Se prepararon tres disoluciones de sales a diferentes concentraciones, azul de metileno, dicromato de potasio y sulfato de plata con concentraciones de 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 150 y 200 ppm (mg/L) para la construcción de las curvas de calibración. Las muestras se evaluaron usando el espectrofotómetro UV-VIS en un rango de longitud de onda ( $\lambda$ ) de 190-800 nm. La longitud de onda se determinó para cada sal (azul de metileno = 608 nm; dicromato de potasio = 352 nm y sulfato de plata = 210 nm). Se graficaron las mediciones de absorbancia en función de la concentración de las disoluciones en la longitud de onda seleccionada. Las correlaciones de las curvas de calibración se realizaron cumpliendo con la ley de Lambert - Beer (Figura 13).

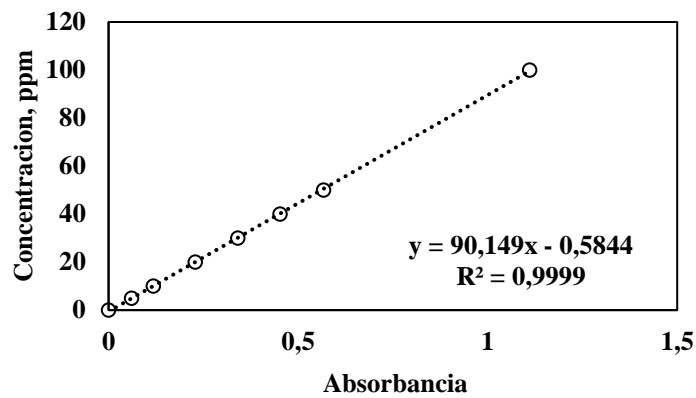
#### **Figura 13**

*Curvas de calibración de las disoluciones de sales*

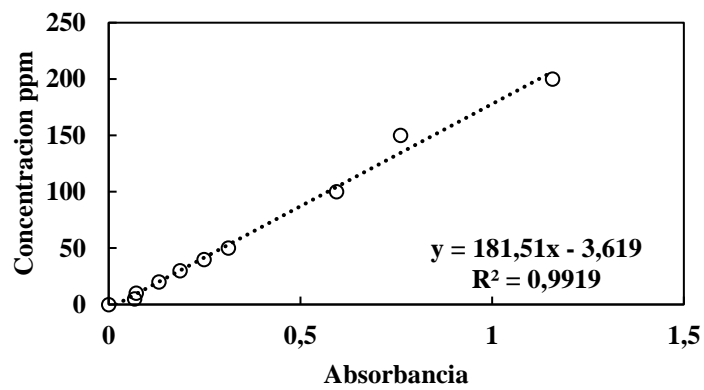
(a)



(b)



(c)



*Nota.* Las curvas de linealización de las sales corresponden a: azul de metileno (a), dicromato de potasio (b) y sulfato de plata, (c).

Las ecuaciones 9,10 y 11 determinan la concentración de las pruebas.

$$C_{e_{\text{Azul de metileno}}} = 935.66Abs_{\lambda} - 2.0894 \quad (9)$$

$$C_{e_{\text{Dicromato de potasio}}} = 90.149Abs_{\lambda} - 0.5844 \quad (10)$$

$$C_{e_{\text{Sulfato de plata}}} = 181.51Abs_{\lambda} - 3.619 \quad (11)$$

Para determinar la linealidad de los puntos, evaluando las regresiones lineales para cada compuesto, se obtuvo un  $R^2$  de 0,9915 para el azul de metileno, y 0,9999 dicromato de potasio y 0,9919 para el sulfato de plata, siendo valores favorables para este comportamiento y seleccionar estas correlaciones para determinar la concentración de las sales luego del proceso de adsorción con los carbones activados.

#### 5.4.2 Análisis de adsorción de azul de metileno

Se preparan por triplicado concentraciones de 50, 100, 150, 200, 250 ppm mg/L de azul de metileno como representación de sal orgánica para los tres carbones activados, cáscara de cacao, bagazo de caña y cuesco de palma. Se realiza el procedimiento anteriormente descrito en la sección 4.2.6. En las tablas 18, 19 y 20 se observan las adsorciones para cada carbón y sus concentraciones finales a una longitud de onda de 608nm.

**Tabla 18**

*Concentración inicial y final de azul de metileno para cáscara de cacao*

Concentración $C_i$ (mg/L)	Adsorción	$C_e$ (mg/L)
50	0,0024	0,13
100	0,0026	0,30
150	0,0027	0,46
200	0,0029	0,62
250	0,0031	0,79

**Nota.** Esta tabla muestra los resultados obtenidos de adsorción de azul de metileno en carbón activado sintetizado a partir de cáscara de cacao.

**Tabla 19***Concentración inicial y final de azul de metileno para bagazo de caña*

<b>Concentraciones Ci (mg/L)</b>	<b>Adsorción</b>	<b>Ce (mg/L)</b>
50	0,0030	0,67
100	0,0036	1,28
150	0,0043	1,89
200	0,0049	2,50
250	0,0056	3,10

*Nota.* Esta tabla muestra los resultados obtenidos de adsorción de azul de metileno en carbón activado sintetizado a partir de bagazo de caña.

**Tabla 20***Concentración inicial y final de azul de metileno para cuesco de palma.*

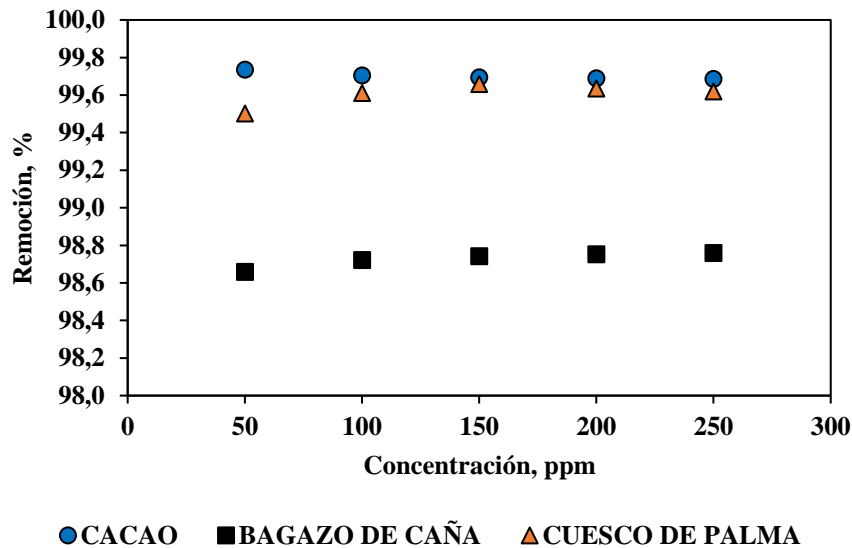
<b>Concentraciones Ci (mg/L)</b>	<b>Adsorción</b>	<b>Ce (mg/L)</b>
50	0,0025	0,25
100	0,0027	0,39
150	0,0028	0,51
200	0,0030	0,73
250	0,0033	0,95

*Nota.* Esta tabla muestra los resultados obtenidos de adsorción de azul de metileno en carbón activado sintetizado a partir de cuesco de palma.

En la Figura 14 se muestra el porcentaje de remoción del azul de metileno de los tres carbones activados.

**Figura 14**

*Porcentaje de remoción vs concentración de azul de metileno para los diferentes carbones*



**Nota.** El gráfico presenta los resultados obtenidos de porcentaje de remoción del azul de metileno para los tres tipos de carbones utilizados.

Los resultados muestran que los carbones activados presentan una alta capacidad de adsorción de azul de metileno. El porcentaje de remoción tiende a aumentar a medida que aumenta la concentración del azul de metileno hasta una concentración máxima y luego tiende a mantenerse constante en presencia de los carbones activados de cuesco de palma y caña. Entre tanto, el porcentaje de remoción por parte del carbón de activado de cáscara de cacao tiende a ser constante en el intervalo de concentraciones entre 50 y 250 ppm.

Los tres carbones activados tuvieron un buen porcentaje de remoción de azul de metileno, los cuales mostraron porcentajes de remoción promedio para la cáscara de cacao, cuesco de palma y bagazo de caña de 99,7, 99,6 y 99 %, respectivamente.

Se analiza el comportamiento de adsorción utilizando los modelos matemáticos de isothermas de Langmuir, Freundlich y Temkin. Mediante los coeficientes de correlación se determina cual modelo es el mejor. En la tabla 21 se pueden observar los  $R^2$  obtenidos para cada modelo.

**Tabla 21**

*Coefficiente de correlación  $R^2$  para los tres modelos matemáticos empleados para el azul de metileno*

Carbón activado	Coeficiente de Correlación $R^2$		
	Langmuir	Freundlich	Temkin
Cáscara de Cacao	0.813	0,999	0,937
Bagazo de caña	0.813	0,999	0,952
Cuesco de palma	0.304	0,974	0,992

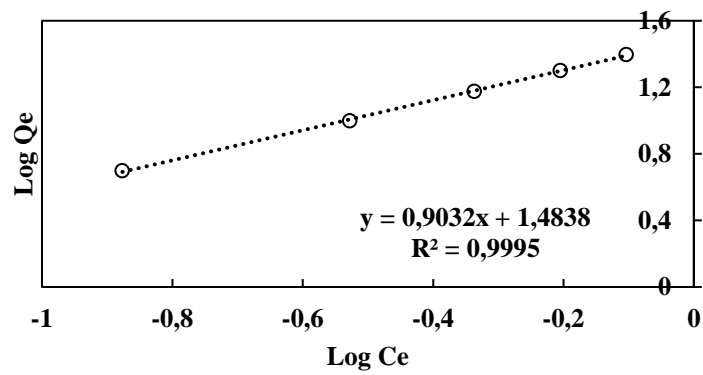
*Nota.* Esta tabla muestra los coeficientes de correlación obtenidos en la adsorción del azul de metileno para los tres modelos matemáticos empleados.

El modelo de Freundlich es el que representa mejor los resultados de adsorción al trabajar con azul de metileno. En la figura 15 se muestran las isothermas de adsorción linealizadas de los datos experimentales ajustados al modelo de Freundlich. En la Tabla 22 se presentan los parámetros obtenidos a partir del modelo de adsorción de azul de metileno.

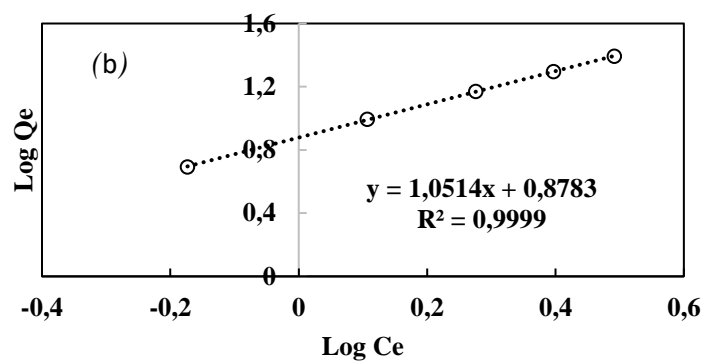
**Figura 15**

*Isothermas de adsorción de azul de metileno según el modelo matemático de Freundlich. (a) C.A. de cáscara de cacao, (b) C.A. de bagazo de caña y (c) C.A. de cuesco de palma*

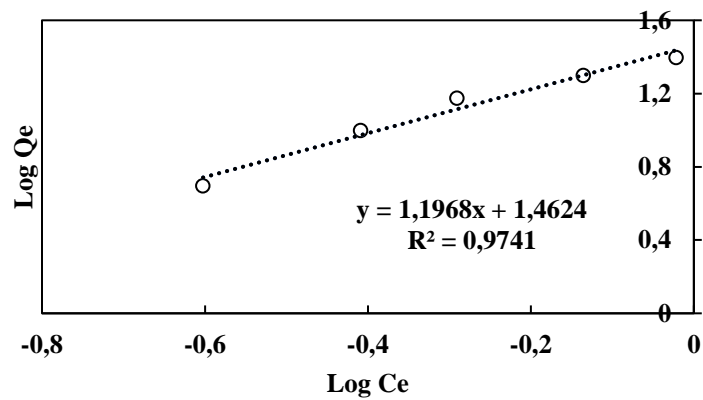
(a)



(b)



(c)



c

**Nota.** El gráfico muestra las isotermas de adsorción de azul de metileno linealizadas de los datos experimentales ajustados al modelo de Freundlich.

**Tabla 22***Parámetros de las isothermas de Freundlich en la adsorción de azul de metileno*

<b>Freundlich</b>			
<b>Carbón activado</b>	<b>n</b>	<b><math>K_F</math></b>	<b><math>R^2</math></b>
Cáscara de Cacao	1,107	30,464	0,999
Bagazo de caña	0,951	7,566	0,999
Cuesco de palma	0,835	29,001	0,974

*Nota.* La tabla muestra los parámetros de las isothermas en la adsorción de azul de metileno para el modelo de Freundlich.

La isoterma de Freundlich es muy aplicada para representar modelos de adsorción para superficies heterogéneas. La constante  $K_f$ , es un indicativo de la capacidad de adsorción del adsorbente y n es una constante indicativa de la intensidad de adsorción. Los resultados muestran que el carbón activado de cáscara de cacao presenta una mayor intensidad de adsorción por parte del azul de metileno.

#### ***5.4.3 Análisis de adsorción de dicromato de potasio***

Se preparan tres veces concentraciones de 50, 100, 150, 200, 250 ppm de dicromato de potasio como representación de una sal inorgánica para los tres carbones activados, siendo cáscara de cacao, bagazo de caña y cuesco de palma. En las tablas 23, 24 y 25 se observan las adsorciones para cada carbón y sus concentraciones finales a una longitud de onda de 352nm. La Figura 16 se muestra el porcentaje de remoción del dicromato de potasio de los tres carbones activados.

**Tabla 23***Concentración inicial y final de dicromato de potasio para cáscara de cacao*

Concentraciones Ci (mg/L)	Adsorción	Ce (mg/L)
50	0,089	7,4
100	0,252	22,2
150	0,505	44,9
200	0,688	61,4
250	0,833	74,5

*Nota.* Esta tabla muestra los resultados obtenidos de adsorción de dicromato de potasio en carbón activado sintetizado a partir de cáscara de cacao.

**Tabla 24***Concentración inicial y final de dicromato de potasio para bagazo de caña*

Concentraciones Ci (mg/L)	Adsorción	Ce (mg/L)
50	0,439	38,98
100	0,772	69,04
150	0,995	89,08
200	1,194	107,02
250	1,283	115,05

*Nota.* Esta tabla muestra los resultados obtenidos de adsorción de dicromato de potasio en carbón activado sintetizado a partir de bagazo de caña.

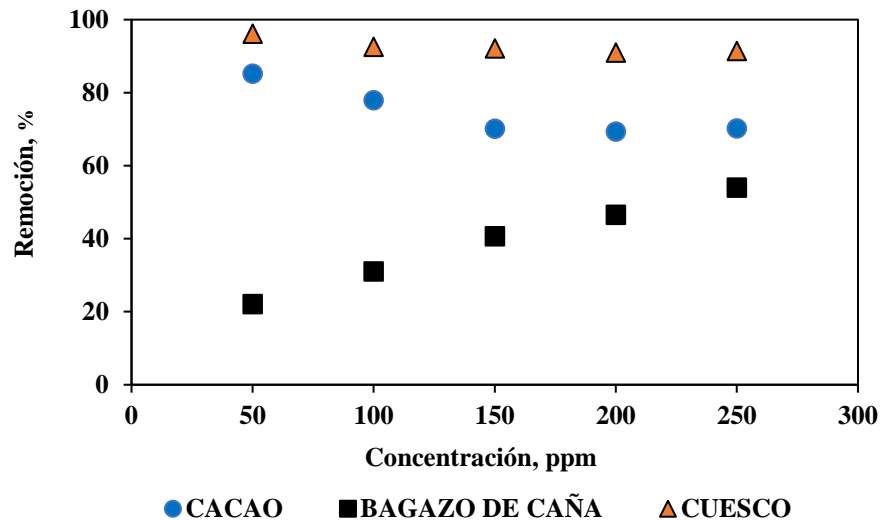
**Tabla 25***Concentración inicial y final de dicromato de potasio para cuesco de palma*

Concentraciones Ci (mg/L)	Adsorción	Ce (mg/L)
50	0,028	1,96
100	0,089	7,47
150	0,138	11,90
200	0,208	18,20
250	0,244	21,45

*Nota.* Esta tabla muestra los resultados obtenidos de adsorción de dicromato de potasio en carbón activado sintetizado a partir de cuesco de palma.

**Figura 16**

*Porcentaje de remoción vs concentración de dicromato de potasio para diferentes carbones*



*Nota.* El gráfico presenta los resultados obtenidos de porcentaje de remoción del dicromato de potasio para los tres tipos de carbones utilizados.

Los resultados muestran que la capacidad de adsorción de dicromato de potasio en presencia de carbón activado de bagazo de caña aumenta conforme aumenta la concentración de la sal. Para el caso del carbón activado de cáscara de cacao la remoción de la sal tiende a disminuir a medida que aumenta la concentración de 50 a 200 mg/L. Por último, el carbón activado de cuesco de palma presenta una mayor estabilidad sobre el porcentaje de remoción del dicromato de potasio.

Los tres carbones activados presentaron diferentes comportamientos sobre el porcentaje de remoción del dicromato de potasio, los cuales mostraron porcentajes de remoción promedio para la cáscara de cacao, cuesco de palma y bagazo de caña de 74,5, 92,6 y 38,8 %, respectivamente.

Se analiza el comportamiento de adsorción utilizando los modelos matemáticos de isothermas de Langmuir, Freundlich y Temkin. Mediante los coeficientes de correlación se determina cual modelo es el mejor. En la tabla 26 se puede observar los  $R^2$  obtenidos para cada modelo.

**Tabla 26**

*Coefficiente de correlación  $R^2$  para los tres modelos matemáticos empleados para el dicromato de potasio*

<b>Carbón activado</b>	<b>Coefficiente de Correlación <math>R^2</math></b>		
	<b>Langmuir</b>	<b>Freundlich</b>	<b>Temkin</b>
Cáscara de Cacao	0,833	0,979	0,886
Bagazo de caña	0,979	0,983	0,795
Cuesco de palma	0,769	0,978	0,871

*Nota.* Esta tabla muestra los coeficientes de correlación obtenidos para el dicromato de potasio para los tres modelos matemáticos empleados.

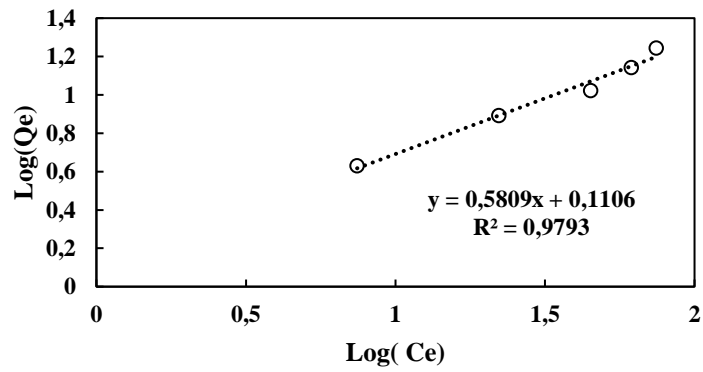
El modelo de Freundlich es el que representa mejor los resultados de adsorción al trabajar con dicromato de potasio para los tres carbones activados. En la figura 17 se muestran las isothermas de adsorción linealizadas de los datos experimentales ajustados al modelo de Freundlich. En la Tabla 27 se presentan los parámetros obtenidos a partir del modelo de adsorción de dicromato de potasio.

**Figura 17**

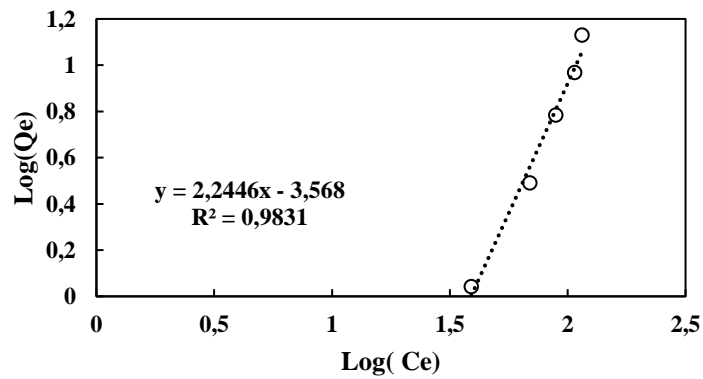
*Isotermas de adsorción de dicromato de potasio según el modelo matemático de Freundlich. C*

*C.A. de cáscara de cacao, c C.A. de bagazo de caña y (c) C.A. de cuesco de palma*

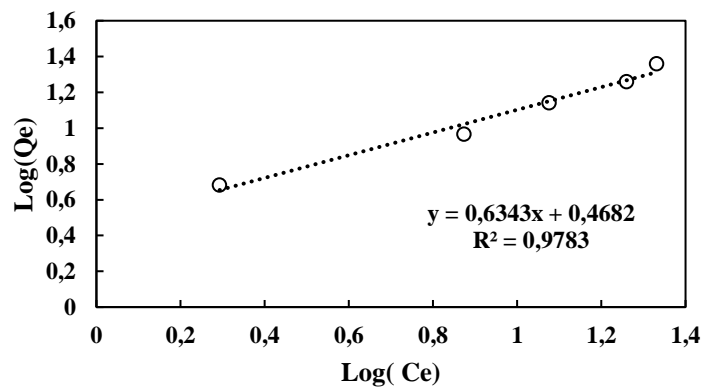
(a)



(b)



(c)



c

*Nota.* El gráfico muestra las isotermas de adsorción de dicromato de potasio linealizadas de los datos experimentales ajustados al modelo de Freundlich.

**Tabla 27**

*Parámetros de las isotermas de Freundlich en la adsorción de dicromato de potasio*

<b>Freundlich</b>			
<b>Carbón activado</b>	<b>n</b>	<b><math>K_F</math></b>	<b><math>R^2</math></b>
Cáscara de Cacao	1,721	1,290	0,979
Bagazo de caña	0,446	0,0003	0,983
Cuesco de palma	1,577	2,939	0,978

*Nota.* La tabla muestra los parámetros de las isotermas en la adsorción de dicromato de potasio para el modelo de Freundlich.

Por otro lado, los valores n y  $K_F$  de las isotermas de Freundlich sugieren que existe una mayor afinidad entre el dicromato de potasio y el carbón activado de cuesco de palma, seguido por el carbón activado de la cáscara de cacao. La intensidad del para metro n corrobora que el carbón activado de bagazo de caña no muestra una interacción significativa con el dicromato de potasio.

#### **5.4.4 Análisis de adsorción de sulfato de plata**

Se preparan tres veces concentraciones de 50, 100,150, 200, 250 ppm mg/L de sulfato de plata como representación de una sal inorgánica para los tres carbones activados, cáscara de cacao, bagazo de caña y cuesco de palma. En las tablas 28,29 y 30 se observan las adsorciones para cada carbón y sus concentraciones finales a una longitud de onda de 210 nm. La Figura 18 muestra el porcentaje de remoción de sulfato de plata de los tres carbones activados.

**Tabla 28***Concentración inicial y final de sulfato de plata para cáscara de cacao*

Concentraciones Ci (mg/L)	Adsorción	Ce (mg/L)
50	0,253	42,2
100	0,462	80,2
150	0,670	118,1
200	0,879	156,0
250	1,088	193,9

*Nota.* Esta tabla muestra los resultados obtenidos de adsorción de sulfato de plata en carbón activado sintetizado a partir de cáscara de cacao.

**Tabla 29***Concentración inicial y final de sulfato de plata para bagazo de caña*

Concentraciones Ci (mg/L)	Adsorción	Ce (mg/L)
50	0,252	42,19
100	0,465	80,77
150	0,703	123,93
200	0,929	164,94
250	1,103	196,49

*Nota.* Esta tabla muestra los resultados obtenidos de adsorción de sulfato de plata en carbón activado sintetizado a partir de bagazo de caña.

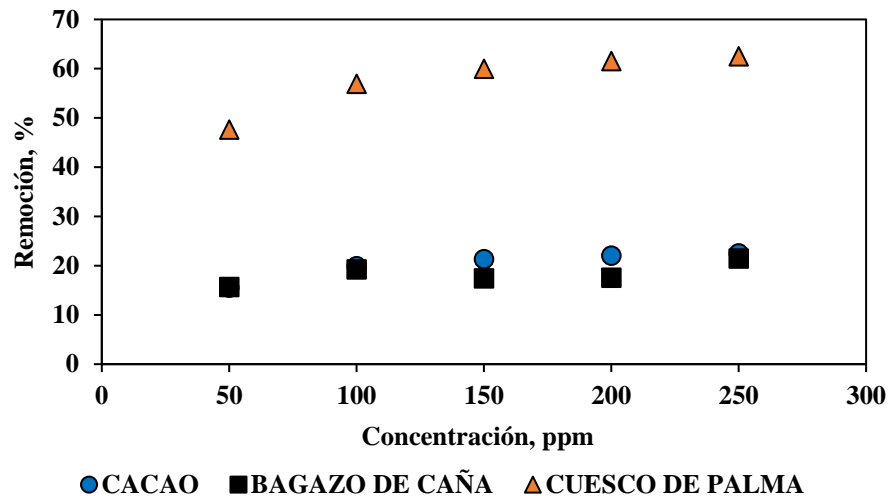
**Tabla 30***Concentración inicial y final de sulfato de plata para cuesco de palma*

Concentraciones Ci (mg/L)	Adsorción	Ce (mg/L)
50	0,164	26,21
100	0,258	43,12
150	0,351	60,03
200	0,444	76,93
250	0,537	93,84

*Nota.* Esta tabla muestra los resultados obtenidos de adsorción de sulfato de plata en carbón activado sintetizado a partir de cuesco de palma.

**Figura 18**

*Porcentaje de remoción vs concentración de sulfato de plata para diferentes carbones*



*Nota.* El gráfico presenta los resultados obtenidos de porcentaje de remoción del sulfato de plata para los tres tipos de carbones utilizados.

Los resultados muestran que los tres carbones activados presentan una mayor capacidad de adsorción del sulfato de plata conforme aumenta su concentración. Los carbones activados a partir de cáscara de cacao y bagazo de caña muestran un porcentaje de remoción de sulfato de plata poco significativo en todo el intervalo de las concentraciones. Entre tanto, el carbón activado de cuesco de palma presenta una mayor remoción de sulfato de plata y, su remoción incrementa a medida que incrementa la concentración de la sal. Los porcentajes de remoción promedio de mayor a menor fue cuesco de palma 57,7% > cáscara de cacao 20,2% > bagazo de caña 18,2 %.

Se analiza el comportamiento de adsorción utilizando los modelos matemáticos de isotermas de Langmuir, Freundlich y Temkin. Mediante los coeficientes de correlación se

determina cual modelo es el mejor. En la tabla 31 se pueden observar los  $R^2$  obtenidos para cada modelo.

**Tabla 31**

*Coefficiente de correlación  $R^2$  para los tres modelos matemáticos empleados para el sulfato de plata*

Carbón activado	Coeficiente de Correlación $R^2$		
	Langmuir	Freundlich	Temkin
Cáscara de Cacao	0,747	0,996	0,952
Bagazo de caña	0,482	0,978	0,863
Cuesco de palma	0,764	0,993	0,966

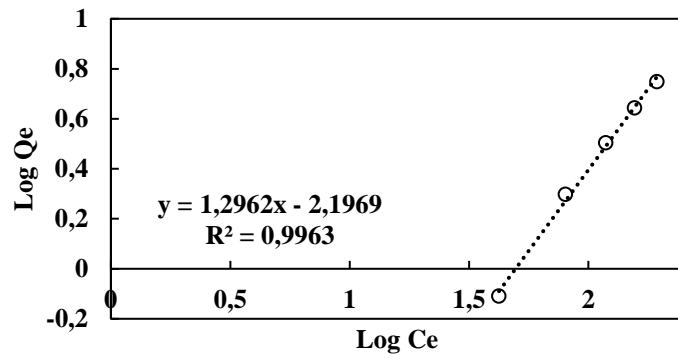
**Nota.** Esta tabla muestra los coeficientes de correlación obtenidos para el sulfato de plata para los tres modelos matemáticos empleados.

El modelo de Freundlich es el que representa mejor los resultados de adsorción al trabajar con sulfato de plata para los tres carbones activados. En la figura 19 se muestran las isotermas de adsorción linealizadas de los datos experimentales ajustados al modelo de Freundlich. En la Tabla 32 se presentan los parámetros obtenidos a partir del modelo de adsorción de sulfato de plata.

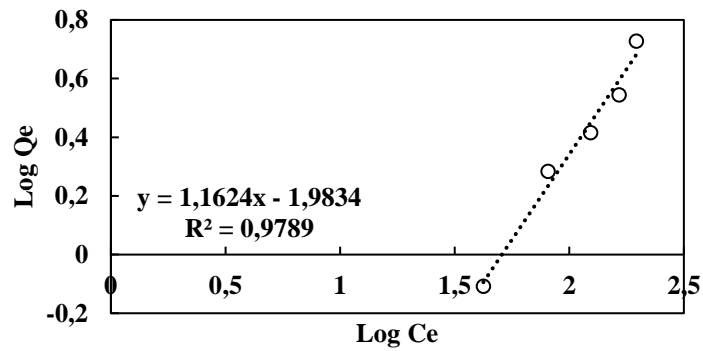
**Figura 19**

*Isotermas de adsorción de sulfato de plata según el modelo matemático de Freundlich. (a) C.A. de cáscara de cacao, (b) C.A. de bagazo de caña y (c) C.A. de cuesco de palma*

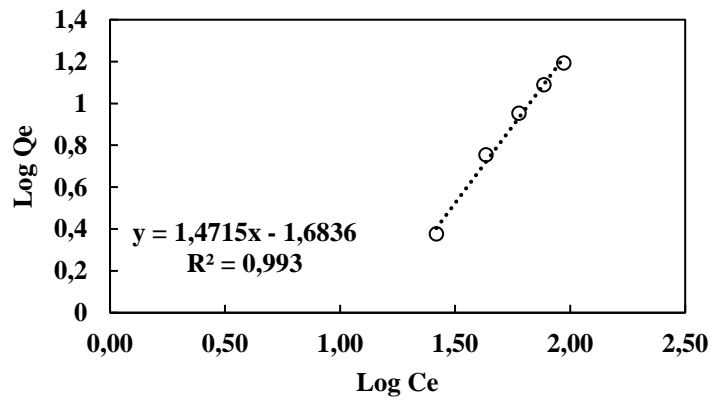
(a)



(b)



(c)



c

**Nota.** El gráfico muestra las isotermas de adsorción de sulfato de plata linealizadas de los datos experimentales ajustados al modelo de Freundlich.

**Tabla 32***Parámetros de las isotermas de Freundlich en la adsorción de sulfato de plata*

<b>Freundlich</b>			
<b>Carbón activado</b>	<b>n</b>	<b><math>K_F</math></b>	<b><math>R^2</math></b>
<b>Cáscara de Cacao</b>	0,771	0,006	0,996
<b>Bagazo de caña</b>	0,860	0,010	0,978
<b>Cuesco de palma</b>	0,680	0,021	0,993

*Nota.* La tabla muestra los parámetros de las isotermas en la adsorción de sulfato de plata para el modelo de Freundlich.

Adicionalmente, los parámetros de la isoterma de Freundlich sugieren que existe una mayor afinidad entre el sulfato de plata y el carbón activado de cuesco de palma.

En forma general se puede indicar que los carbones activados sintetizados en este trabajo mostraron mayor afinidad con la sal orgánica de azul de metileno, y este efecto se debe posiblemente a la interacción entre los grupos funcionales de los carbones activados y la sal orgánica. Sin embargo, el carbón activado a partir del cuesco de palma presentó un mayor porcentaje de remoción de dicromato de potasio y sulfato de plata con mayor preferencia en comparación con los carbones activados de cáscara de cacao y bagazo de caña. En resumen, los resultados revelan que la naturaleza de la biomasa residual vegetal y las condiciones de síntesis generan profundas diferencias en cada carbón activado sobre la adsorción de sales orgánicas e inorgánicas.

## 6. Discusión de resultados

Los resultados experimentales muestran que los tres carbones activados lograron una eficiencia de remoción superior al 99% de azul de metileno para concentraciones de 50 a 250 ppm. A medida que la concentración aumenta, la eficiencia de remoción se mantiene estable en presencia de los carbones activados de cascara de cacao, cuesco de palma y bagazo de caña, lo que puede ser ocasionado por una saturación del adsorbato sobre el carbón activado.

Por otra parte, en relación al dicromato de potasio se obtuvieron porcentajes de remoción alrededor de 92,6% para cuesco de palma, 74,5 para cascara de cacao y 38,8% para bagazo de caña. Lo que siguiera una excelente adsorción para el carbón activado de cuesco de palma, una adsorción buena para el de cascara de cacao y una adsorción baja del carbón activado de bagazo de caña. La selectividad sobre la adsorción del dicromato de potasio en los carbones activados se debe posiblemente a la combinación de factores relacionados con su estructura química, estado de ionización ( $2K^+$ ,  $Cr_2O_7^{2-}$ ) y la superficie de cada uno de los materiales adsorbentes. Además, es posible que, aunque en la superficie de los carbones activados existan grupos funcionales oxigenados los cuales fueron identificados mediante espectroscopia de FTIR-ATR, es importante considerar que estos puedan repeler los aniones tipo  $Cr_2O_7^{2-}$ . Así mismo, estos iones se pueden hidratar fácilmente por moléculas de agua, las cuales tienden a estabilizar estas especies en solución.

Por último, la evaluación de la adsorción de sulfato de plata presento adsorciones bajas en comparación con las otras dos sales analizadas. Con valores de remoción para carbón activado de cuesco de palma 57,7%, cáscara de cacao 20,2% y bagazo de caña 18,2 %. La baja adsorción se puede deber al tamaño de los iones de plata que al hidratarse pueden ser demasiado grandes

respecto al tamaño de los poros del carbón activado. En forma general el sulfato de plata ( $\text{Ag}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) se adsorbe poco en carbones activados con grupos oxigenados debido a razones similares a otros compuestos inorgánicos iónicos, relacionadas con su disociación en solución, las interacciones fisicoquímicas y la naturaleza de la superficie del carbón activado. Considerando las variables anteriores y los efectos de hidratación generan una barrera, la cual tiende a disminuir la interacción con la superficie del material adsorbente. Por tanto, es posible que las interacciones sean débiles entre los iones y el carbón. Para disminuir estos retos sobre la adsorción de sales inorgánicas se recomienda aplicar en futuras investigaciones otros métodos de activación usando especies de Fe, Zn, aminas y nanopartículas, entre otros. De la misma manera, aunque en este trabajo no se evaluó el efecto del pH, es posible optimizar esta variable a valores ácidos para ajustar la carga superficial de los materiales adsorbentes.

Se utilizaron los modelos matemáticos de isotermas de Langmuir, Freundlich y Temkin. El modelo de Freundlich fue el que presentó el mejor ajuste a los datos experimentales para la remoción de azul de metileno en carbón activado de cáscara de cacao, cuesco de palma y bagazo de caña, los cuales presentaron coeficientes de correlación  $R^2$  alrededor de 0,999, 0,998 y 0,974, respectivamente. Para el dicromato de potasio en carbón activado de cascara de cacao, cuesco de palma y bagazo de caña los coeficientes de correlación fueron de 0,979, 0,983 y 0,978. Finalmente, el coeficiente de correlación para el sulfato de plata se ajustó en los carbones activados a partir de cáscara de cacao, cuesco de palma y bagazo de caña con valores de 0,996, 0,978 y 0,993. Estos resultados permiten esclarecer que los materiales adsorbentes sintetizados en esta investigación presentan heterogeneidad en su superficie, la cual permite una posible interacción por multicapas. Los resultados obtenidos coinciden con los resultados reportados por autores como (Contreras

Arenas, J. D. y Garnica Fuentes, C. F., 2021; León, A. et al., 2021; Pacheco Gómez, A. A. y Contreras Silva, I. V., 2024)., evidenciando la eficiencia del uso de carbones activados sintetizados a partir de biomasa residual vegetal en el tratamiento de aguas residuales de la industria petrolera.

Aplicando el método de Brunauer, Emmett y Teller (BET), se determinó el área superficial y el volumen poroso de los tres carbones activados. Clasificándolos como mesoporosos (2-50 nm diámetro). El carbón activado que mostro una mayor área superficial fue la cascara de cacao 971  $m^2/g$  seguido de cuesco de palma 890  $m^2/g$  y por último bagazo de caña 215  $m^2/g$ . Los tres carbones activados presentaron las curvas de adsorción y desorción de  $N_2$  tipo IV correspondiente a adsorción multicapa sobre material poroso y su ciclo de histéresis. Por tanto, a la luz de los resultados se puede indicar que aunque los carbones activados se prepararon bajo las mismas condiciones experimentales, sus propiedades textuales están influenciadas por la naturaleza química de los componentes de la biomasa residual de partida.

En forma general, los resultados obtenidos muestran que los carbones activados utilizados tienen una alta capacidad de remoción de sales en sistemas acuosos. Resaltando la eficiencia del carbón activado de cuesco de palma el cual presento los datos de mayor remoción para las tres sales estudiadas. No obstante, es importante evaluar los efectos que pueden traer en la adsorción la presencia de otros iones presentes en aguas residuales, además el estudio de la posibilidad de la reutilización del carbón activado y sus ciclos de uso como material adsorbente.

## 7. Conclusiones

Considerando los objetivos propuestos y los resultados obtenidos en esta investigación se plantean las siguientes conclusiones:

Las aguas producidas por la industria petrolera son aguas constituidas por un amplio contenido de sales orgánicas e inorgánicas (metales), y sus propiedades fisicoquímicas esta influenciada por las propiedades de las formaciones geológicas donde se extrae petróleo y gas. A partir de la revisión bibliográfica, se logró determinar que el corte de agua en los proyectos de producción de crudo es muy alto, y por tanto merecen una atención en su buen tratamiento e incluso para mejorar la huella hídrica cumpliendo con los objetivos de desarrollo sostenible.

El proceso de pirolisis con activación de ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) sobre biomasa residual vegetal permitió la obtención de carbones activados con rendimiento en el intervalo de 30.2 a 51.6 % en peso. Adicionalmente, los resultados del análisis BET establecieron que los carbones activados presentaron un comportamiento multicapa de tipo IV según la IUPAC, el cual fue identificado debido a la presencia de histéresis en la tendencia de las curvas de adsorción - desorción. Los carbones activados sintetizados se califican por su tamaño de poro y tipo de isoterma como mesoporosos. Los carbones activados a partir de cuesco de palma y cáscara de cacao mostraron excelentes propiedades texturales con valores de área superficial de 890 y 971  $m^2/g$ .

Los carbones activados sintetizados a partir de las biomásas de bagazo de caña, cuesco de palma y cascara de cacao, activados con ácido fosfórico, presentaron grupos funcionales -OH, C=O, C-O-C, posiblemente asociados a sustancias como hidroxilos, fenoles, ácidos carboxílicos, éteres y ésteres. Demostrando que la adsorción de sales por los carbones activados se debe a la naturaleza química del material y su textura.

Los tres carbones activados presentaron resultados con diferente efectividad en la remoción de sales tales como azul de metileno, dicromato de potasio y sulfato de plata. El carbón más efectivo fue el cuesco de palma sobre remoción de azul de metileno, dicromato de potasio y sulfato de plata con valores promedio de 99.6%, 92.6 % y 57.7 %, respectivamente. Por tanto, el uso de carbón activado sintetizado a partir de biomasa residual proveniente de procesos agroindustriales, se pueden considerar como una herramienta de gran interés en la remoción de sales en aguas contaminadas, a partir de los mecanismos de adsorción.

El análisis de adsorción de los tres carbones activados se realizó usando las isotermas de los modelos matemáticos de Langmuir, Freundlich y Temkin. La isoterma de Freundlich presentó valores mayores en cuanto a los coeficientes de correlación  $R^2$ . Para el cuesco de palma el modelo de Freundlich mostró coeficientes de correlación para azul de metileno, dicromato de potasio y sulfato de plata valores de 0.9783, 0.9783 y 0,993.

## 8. Recomendaciones

Se sugiere complementar los ensayos de caracterización con el uso de técnicas de caracterización como espectroscopía Raman y la microscopía electrónica de barrido (SEM), con la finalidad de obtener un mayor detalle en las propiedades texturales y estructural de los carbones activados.

Evaluar el efecto de la variación en parámetros como la agitación, pH de la disolución y la temperatura en el proceso remoción de sales en aguas contaminadas, usando carbones activados obtenidos a partir de biomasa residual de cultivos autóctonos de Santander.

Evaluar diferentes procesos de activación y pirolisis sobre biomasas residuales vegetales para garantizar altas eficiencias sobre la remoción sales orgánicas e inorgánicas en aguas contaminadas.

Evaluar el efecto de los carbones activados en aguas contaminadas a escala piloto en condiciones dinámicas.

### Referencias Bibliográficas

- Al-Ghouti, M. A., Al-Kaabi, M. A., Ashfaq, M. Y., & Da'na, D. A. (2019). Produced water characteristics, treatment and reuse: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 28, 222-239.
- Alzconsult International, (2005). Guía para la disposición y el tratamiento de agua producida. Guía de ARPEL No. 1. Calgary, Canadá.
- Arias Hernández, C. J., & Manrique Pinto, J. F. (2018). *Analysis of the energetic potential and mathematical modelling of the thermal decomposition of the palm kernel shell and empty fruit bunch of the African oil palm* [Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico]. Universidad Industrial de Santander.
- Bayona Tolola, C. O. (2023). Análisis de tecnologías para el tratamiento de aguas de producción de la industria de hidrocarburos y su potencial uso en sistemas de riego.
- 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. *Universidad Nacional de Colombia*.
- Carrillo Pérez, J. A. (2010). *Diseño conceptual de una planta para el tratamiento y disposición final de aguas de producción, provenientes del campo aguasay en el estado monagas* (Doctoral dissertation).
- Collard, F. X., & Blin, J. (2014). A review on pyrolysis of biomass constituents: Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin. *Renewable and sustainable energy reviews*, 38, 594-608.
- De los Santos, C. R., Fernández, J. B., Hernández, G. P., Rivera, M. Á. H., & Flores, L. L. D. (2019). Adsorción de cobre (II) y cadmio (II) en suspensiones acuosas de CaCO<sub>3</sub> biogénico nanoestructurado. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 58(1), 2-13.
- Duraisamy, R. T., Beni, A. H., & Henni, A. (2013). State of the art treatment of produced water. *Water Treatment*, 199.
- Ecopetrol. (2023). *Informe Integrado de Gestión e Informe Anual de Gobierno Corporativo 2023*. Recuperado de [<https://>

files.ecopetrol.com.co/web/esp/agaesp2023/informe-integrado-gestion2022.pdf].

Esparza Plata, R. A. (2016). *Tratamiento de agua producida en campos de explotación de hidrocarburos, para disposición final mediante reinyección a pozos* [Trabajo de especialización, Universidad Industrial de Santander].

García Arévalo, D. A., Nieto Pulido, S., & Rueda Vélez, L. C. (2022). *Sistemas de tratamiento de aguas de formación en campos petroleros para el uso del agua en la agricultura y su potencial en Colombia* [Proyecto integral de grado para optar al título de Especialista en Gerencia de Proyectos, Fundación Universidad de América].

Gómez Bustillo, G. E. (2014). Modelo cinético del bagazo de la caña de azúcar.

Güldemund, A., Schüngel, J., Schebek, L., Schaldach, R., & Zeller, V. (2025). The regional nature of circular bioeconomy: Comparing the availability of residual biomass at national, regional and city level. *Resources, Conservation and Recycling*, 215, 108125.

Henzen, R., & Week, E. (2022). *Economía circular: un enfoque práctico para transformar los modelos empresariales: Marge Books1 (1)*. 31-32.

Lee, C. H., & Lee, M. G. (2017). Adsorption characteristics of lithium ions on coconut-based activated carbons modified with acids. *Desalination and Water Treatment*, 77, 274-281.

León, A. Y., Contreras-Arenas, J. D., Garnica-Fuentes, C. F., Jiménez-Caballero, M. A., Pinto-Hernández, D. F., Ariza-León, E., ... & Molina-Velasco, D. R. (2023). Removal of organic compounds in wastewater using cocoa shell-based activated carbon-SiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Environment, Development and Sustainability*, 1-20.

Manals-Cutiño, E., Penedo-Medina, M., & Giralt-Ortega, G. (2011). Análisis termogravimétrico y térmico diferencial de diferentes biomásas vegetales. *Tecnología Química*, 31(2), 180-190.

Mata-Miranda, M. M., Guerrero-Robles, C. I., Rojas-López, M., Delgado-Macuil, R. J., González-Díaz, C. A., Sánchez-Monroy, V., ... & Vázquez-Zapién, G. J. (2017). Componentes principales mediante espectroscopia FTIR como técnica de caracterización innovadora durante la diferenciación de células madre pluripotentes a células pancreáticas. *Revista mexicana de ingeniería biomédica*, 38(1), 225-234.

Mesa, S. L., Orjuela, J. M., Ramírez, A. T. O., & Herrera, J. A. S. (2018). Revisión del panorama actual del manejo de agua de producción en la industria petrolera colombiana. *Gestión y Ambiente*, 21(1), 87-98.

- Mendoza Acevedo, E. J. (2018). Afectaciones potenciales por las aguas de producción de la industria de hidrocarburos sobre la ictiofauna: cuenca de los Llanos Orientales, región de la Orinoquía, Colombia.
- Molina-Calderón, L., Basualto-Flores, C., Paredes-García, V., & Venegas-Yazigi, D. (2022). Advances of magnetic nanohydrometallurgy using superparamagnetic nanomaterials as rare earth ions adsorbents: A grand opportunity for sustainable rare earth recovery. *Separation and Purification Technology*, 299, 121708.
- Nasiri, M., Jafari, I., & Parniankhoy, B. (2017). Oil and gas produced water management: a review of treatment technologies, challenges, and opportunities. *Chemical engineering communications*, 204(8), 990-1005.
- Ortega Ramírez, A. T., Arcila, Y. F., & Vargas Díaz, L. M. Review of the diagnosis of production water treatment in Colombian petroleum fields.
- Penedo-Medina, M. (2011). Análisis termogravimétrico y térmico diferencial de diferentes biomásas vegetales. *Chemical Technology*, 31(2), 36-43.
- Ortiz, W. G. C. (2014). Tratamientos aplicables a materiales lignocelulósicos para la obtención de etanol y productos químicos. *Revista de Tecnología (Archivo)*, 13(1), 39-44.
- Ramírez, A. T. O., Arcila, Y. F., & Díaz, L. M. V. (2019). Revisión del diagnóstico de tratamiento de aguas de producción en campos petroleros colombianos. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 19(2), 61-75.
- Reyes, J. S. G., Velasco, S. L. H., & Simancas, M. E. C. (2017). Manejo del agua de producción para proyectos de gas en aguas profundas y ultra-profundas del Caribe Colombiano.
- Rico, M. C. C., & Barbosa, A. (2023). Estrategias de gestión hídrica en el sector de hidrocarburos: revisión. *Informador técnico*, 87(1), 65-81.
- Salamanca, E. (2016). Tratamiento de aguas para el consumo humano. *Módulo arquitectura-CUC*, 17, 29-48.
- Salcedo-Puerto, O., Mendoza-Martinez, C., & Vakkilainen, E. (2025). Colombian agroindustrial crop residues: Thermochemical characterization and evaluation of their energy potential. *Energy Reports*, 13, 1802-1816.
- Söğüt, E. G., & Gülcan, M. (2023). Adsorption: basics, properties, and classification. In *Adsorption through advanced nanoscale materials* (pp. 3-21). Elsevier.

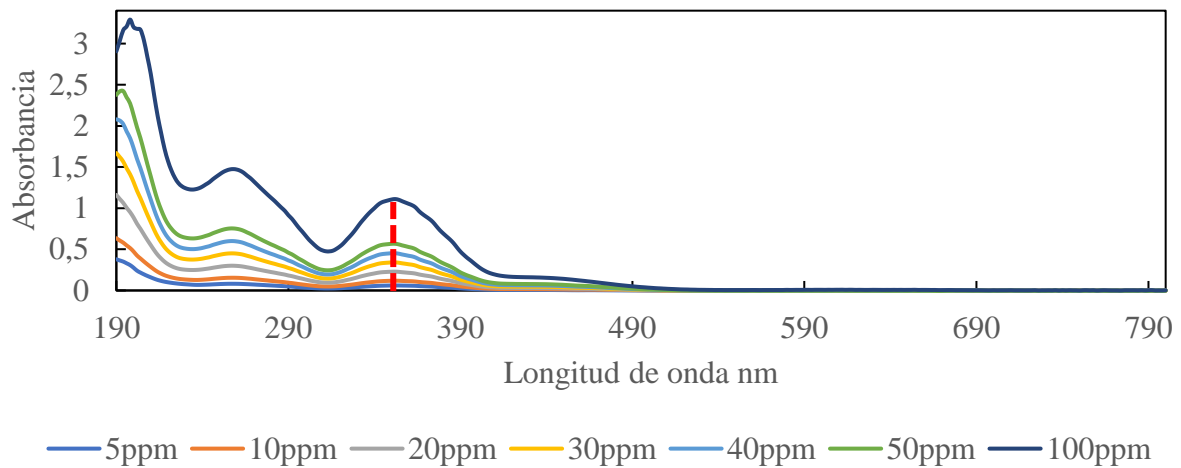
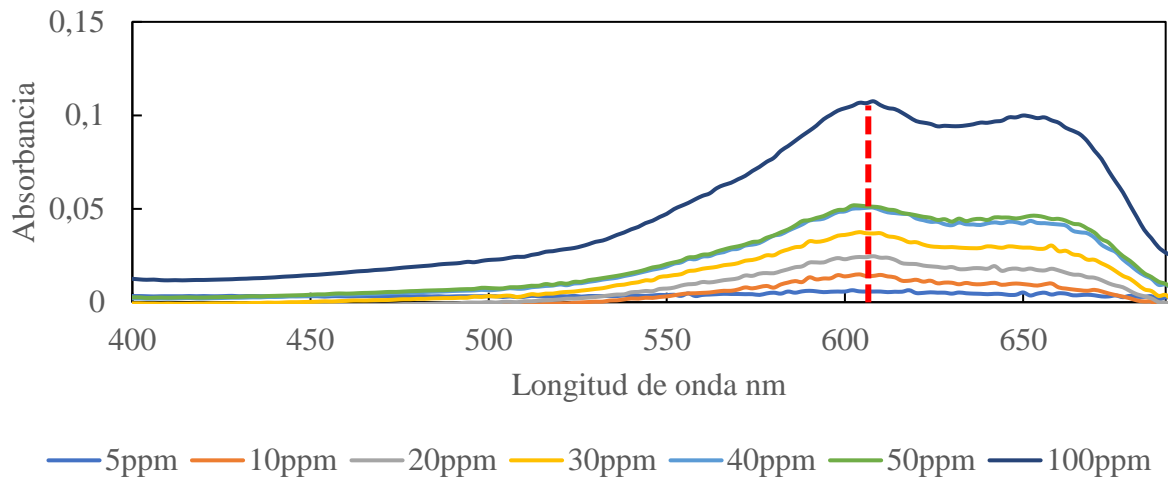
Valencia, C.E. (2023). *Características del agua producida y su tratamiento para el aprovechamiento en la industria petrolera*. Unam.mx:8080. Recuperado el 31 de marzo de 2025, de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/RepoFi/18794/Tesis.pdf?sequence=8&isAllowed=y>

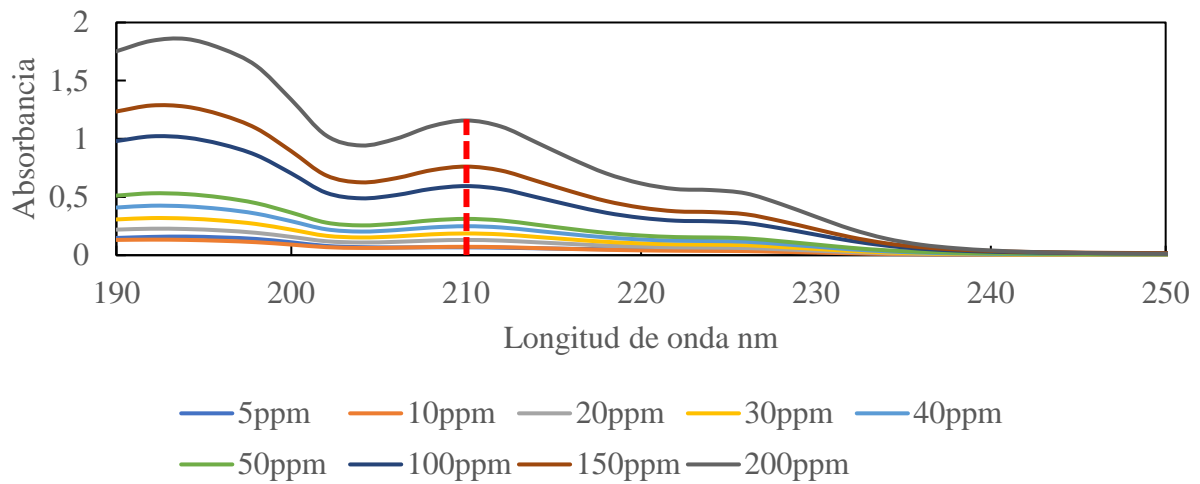
Valladares-Cisneros, M. G., Valerio-Cárdenas, C., de la Cruz-Burelo, P., & Melgoza-Alemán, R. M. (2017). Adsorbentes no-convencionales, alternativas sustentables para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 16(31), 55-73.

Apéndices

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

Apéndice A Curvas espectro UV-VIS para diferentes concentraciones de sales





*Nota.* Las curvas de lectura UV-VIS se realizaron para cada sal y están mostradas así: (a) azul de metileno SS, (b) bagazo de caña, (c) cuesco de palma.