

**EVALUACIÓN DEL FIQUE Y ASERRÍN COMO MATERIALES ADSORBENTES
DE DIÉSEL EN AGUA**

JOHN JAIRO CHINCHILLA LOZANO

JULIAN ANDRES LÓPEZ LÓPEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2019

**EVALUACIÓN DEL FIQUE Y ASERRÍN COMO MATERIALES ADSORBENTES
DE DIÉSEL EN AGUA**

**JOHN JAIRO CHINCHILLA LOZANO
JULIAN ANDRES LÓPEZ LÓPEZ**

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Químico

**DIRECTOR
RAMIRO MARTÍNEZ REY
Ph.D. En Ingeniería Química**

**CODIRECTOR
GIOVANNI MORALES MEDINA
Ph.D. En Ingeniería Química**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2019

DEDICATORIA

A **DIOS** por nunca dejarme solo y darme las fuerzas necesarias para cumplir este sueño, llenándome siempre de bendición y sabiduría.

A la memoria de mi abuelo **Isaias Lozano Jaime**, quien formó en mi un espíritu humilde y de servicio, dándome las bases necesarias para algún día ser como el gran hombre que él fue.

A mi madre **Nancy Lozano Carrascal**, que me enseñó valores morales que me hacen quien soy hoy en día, por enseñarme a luchar por lo que quiero y estar siempre dispuesta a darlo todo por verme alcanzar mis sueños y siempre creer en mis capacidades.

A mi papá **Serafin Peña Cubides**, el hombre que me mostró como debe ser un caballero y que me enseñó que siempre es necesario dar lo mejor de mí en cada cosa que hago, viviendo cada día con un propósito para no perder nunca la ilusión.

A mi hermano **Cristian Manuel Peña**, el futuro ingeniero de la familia, mi cómplice, mi eterno amigo, el mejor regalo que Dios me dio y quien me motiva siempre a darlo todo para ser su orgullo.

A mi abuelita **Ana Ilse Carrascal**, tíos y tías, que de una u otra forma me demostraron todo su apoyo a lo largo de mi vida, quienes me enseñaron que la familia debe mantenerse unida y apoyarse en todo momento y formaron en mi el concepto de amor por familia.

A mi novia **Michelle Barrientos Ospina**, por apoyarme en todo el desarrollo de este proyecto y siempre tener las palabras adecuadas para motivarme a continuar.

John Chinchilla

DEDICATORIA

A **DIOS**, por ser me guía y brindarme sabiduría y paciencia para llevar las situaciones que se me presentan a diario de la mejor manera; por darme salud y permitirme estar cerca de las personas que amo.

A mis padres **JAIRO ALBERTO LOPEZ CASTRO y DIANA PATRICIA LOPEZ PEREZ**, por ser quienes me moldearon a ser la persona que soy hoy en día, por todos los valores y las enseñanzas que me inculcaron y por el amor y apoyo incondicional que me brindan,

A mi abuela **EDELMIRA PEREZ**, por ser una de las personas que más cariño y amor me brinda, por siempre querer lo mejor para mí y mi futuro y siempre estar dispuesta a dar lo mejor de sí por el bienestar de la familia.

A mi hermano **SANTIAGO LOPEZ LOPEZ**, con quien he compartido muchas historias de hermandad y apoyo mutuo, una persona con siempre buenas intenciones y bondad en su actuar.

A mi novia **LOGAN NEWCOMER**, por ser la mejor compañera de vida que pueda desear, por su amor y apoyo que me enseñan a crecer como persona; por su forma de hacerme ver la vida y su empatía de la que día a día me contagio.

A mis familiares por sus bendiciones y buenos deseos.

Julian Lopez²

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este proyecto manifiestan sus más sinceros agradecimientos:

Al doctor en Ingeniería química **Ramiro Martínez Rey** por permitirnos desarrollar esta investigación en el laboratorio de catálisis de la escuela de Ingeniería Química, además de orientarnos y transmitirnos su conocimiento durante el desarrollo de esta investigación.

Al doctor en Ingeniería Química **Giovanni Morales Medina** por la orientación y el conocimiento transmitido durante cada etapa de esta investigación.

A los técnicos de soporte académico **Guillermo Acero Medina, Luis Eduardo Carreño Pérez y Wilson Eduardo Carreño Soler**, por su dedicación, colaboración y apoyo en cada una de las etapas y retos que se presentaron a lo largo de este proyecto, mostrando siempre una cara amable y una disposición de ayuda.

Al químico **Héctor Joaquín Orozco Monroy** por su plena disposición, apoyo y dedicación, orientando cada una de las situaciones críticas que alcanzó esta investigación, ofreciéndonos siempre su conocimiento abiertamente.

A la auxiliar administrativa **Lina Jazmín Afanador Díaz** por su paciencia y orientación en todos los procesos administrativos que fueron llevados a cabo.

TABLA DE CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN.....	16
1. OBJETIVOS	17
1.1. OBJETIVO GENERAL	17
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2. MARCO TEORICO	18
2.1. TRATAMIENTO DE AGUAS CONTAMINADAS	19
2.2. RESIDUOS VEGETALES USADOS COMO ADSORBENTES	20
2.2.1. Figue o cabuya de figue	21
2.2.2. Eucalipto o Eucalyptus	21
2.2.3. Moncoro o Cordia gerascanthus L.	21
3. ESTADO DEL ARTE	22
4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	24
4.1. TRATAMIENTO PRELIMINAR DE LOS MATERIALES	24
4.1.1. Adquisición de materiales.	24
4.1.2. Reducción de tamaño de los materiales adsorbentes.	25
4.1.3. Clasificación por tamaño.	25
4.1.4. Lavado de las partículas.	25
4.1.5. Secado de las partículas.	25
4.2. LEY DE LAMBERT-BEER	26
4.3. DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN:	27
4.4. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	27
4.5. PROCEDIMIENTO.....	28
4.6. ANÁLISIS UV-VIS.....	30

4.7. CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA DE CAPACIDAD DE ADSORCIÓN VS TIEMPO.....	30
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	31
5.1. SELECCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA	31
5.2. ANÁLISIS DE LA CAÍDA DE PRESIÓN DE LA COLUMNA	32
5.3. CURVA DE CALIBRACIÓN	33
5.4. TRANSFORMACIÓN DE ABSORBANCIA A CONCENTRACIÓN	35
5.5. CAPACIDAD DE ADSORCIÓN	36
5.6. MARCO LEGAL	39
6. CONCLUSIONES.....	40
BIBLIOGRAFÍA.....	41

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Cantidad de material por tamaños de partícula.....	31
Tabla 2. Parámetros para el cálculo de la caída de presión de cada material.....	33
Tabla 3: Transformación de datos de absorbancia a concentración.....	35
Tabla 4. Porcentaje de error de los valores experimentales respecto a la linea de tendencia.....	38
Tabla 5. Comparación de las concentraciones más bajas obtenidas con los valores permitidos para vertimientos.....	39

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Etapas para la realización del proyecto.....	24
Figura 2: Montaje experimental.....	29
Figura 3: Curva de calibración a 339 nm.....	34
Figura 4: Relación de concentración vs tiempo.....	36
Figura 5: Curva de calibración usando surfactante	48
Figura 6: Adsorbancia de agua destilada después de pasar por la columna.....	49

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Demostración de la no linealidad para la curva de calibración con texapon.....	48
ANEXO B. Selección de la longitud de onda a trabajar	49

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DEL FIQUE Y ASERRÍN COMO MATERIALES ADSORBENTES DE DIÉSEL EN AGUA *

AUTORES: JOHN JAIRO CHINCHILLA LOZANO
JULIAN ANDRES LÓPEZ LÓPEZ **

PALABRAS CLAVE: Columna de adsorción, diésel, espectrofotometría UV-VIS, aserrín, eucalipto, moncoro, fique.

DESCRIPCIÓN:

El consumo de agua se encuentra fuertemente ligado a la industria petrolera, pero lamentablemente debido a diferentes factores como derrames de hidrocarburos, eliminación de aguas de producción y procesos, se contaminan fuentes hídricas que abastecen poblaciones y ecosistemas. Esta situación causa entre otras cosas, aumento de la DBO, eutrofización de fuentes receptoras y muerte de distintas especies de seres vivos.

En el presente trabajo, se evaluó la capacidad de adsorción del fique, aserrín de moncoro y eucalipto como diferentes empaques para una columna de adsorción de diésel en agua, a condiciones de presión y temperatura ambiente. Se prepararon los materiales en procesos de molienda, lavado, secado y tamizado, seleccionando 425 μm como tamaño de partícula para empacar la columna. Se preparó una mezcla de diésel en agua con una concentración para la alimentación de 0,122% p/p que se hizo circular a través del lecho durante 5 h, tomando muestras cada 15 minutos. Por último, estas muestras fueron llevadas a un espectrofotómetro UV-VIS para su caracterización.

De los materiales estudiados, se logró determinar que el eucalipto es el mejor de los tres materiales absorbentes de diésel bajo las condiciones a las que fueron sometidos, notándose que este presentaba una mayor remoción del hidrocarburo a lo largo del tiempo de experimentación, en comparación con los otros dos materiales evaluados.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Directores: Ramiro Martínez Rey, Doctor en Ingeniería Química. Giovanni Morales Medina, Doctor en Ingeniería Química.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF FIQUE AND SAWDUST AS DIESEL IN WATER ADSORBENT.

AUTHORS: JOHN JAIRO CHINCHILLA LOZANO
JULIAN ANDRES LÓPEZ LÓPEZ

KEYWORDS: Adsorption column, diesel, UV-VIS spectrophotometry, sawdust, eucalyptus, moncoro, fique.

DESCRIPTION:

Water consumption is strongly linked to the oil industry, but unfortunately due to different factors such as oil spills, elimination of production and process waters, water sources that supply populations and ecosystems are being contaminated. This situation causes among other things, increased BOD, eutrophication of receiving sources and death of different species of living beings.

In the present work, the adsorption capacity of the fique, sawdust of moncoro and eucalyptus was evaluated as different beds for an adsorption column of diesel in water, under conditions of pressure and ambient temperature. The materials were prepared in grinding, washing, drying and sieving processes, selecting 425 μm as the particle size to pack the column. A mixture of diesel in water was prepared with a feed concentration of 0.122% w / w that was circulated through the bed for 5 h, taking samples every 15 minutes. Finally, these samples were taken to a UV-VIS spectrophotometer for characterization.

From the materials studied, it was possible to determine that eucalyptus is the best of the three diesel absorbing materials under the conditions to which they were subjected, noting that this presented a greater removal of the hydrocarbon throughout the time of experimentation, in comparison with the other two materials evaluated.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Directors: Ramiro Martínez Rey, Doctor in Chemical Engineering. Giovanni Morales Medina, Doctor in Chemical Engineering.

INTRODUCCIÓN

Hasta el año 2014 se estimó que la industria petrolera utilizaba el 0,35% del consumo de agua a nivel nacional¹. Además, las compañías petroleras para el año 2000 ya producían tres barriles de agua para extraer cada barril de petróleo de yacimientos agotados, y sumado a esto, se generaban 75'000.000 de barriles de petróleo mundialmente al día². Se puede así deducir que el agua se encuentra íntimamente asociada a esta industria, sin embargo, debe existir una buena relación entre el aprovechamiento de este recurso y el cuidado del medio ambiente, evitando así, entre uno de los tantos problemas, la afectación de las fuentes hídricas que terminarían dañando los ecosistemas e impidiendo hacer uso de estas aguas³.

Para contrarrestar lo anterior, la industria petrolera cuenta con estrategias como el uso de plantas de tratamiento para aguas finales de proceso, métodos de contención y tratamiento de derrames. Para complementar y mejorar estos procesos, se buscan materiales adsorbentes que realicen una mejor remoción de los hidrocarburos presentes en agua y a su vez disminuyan la inversión de capital, teniendo en cuenta que para inicios de siglo a nivel mundial ya se invertían alrededor de \$USD 40.000'000.000 al año para hacer frente a los problemas de aguas contaminadas⁴. Por ende, en esta investigación se evalúan diferentes biomateriales con bajo costo y alta disponibilidad local, como lo son la fibra de fique, el aserrín de moncoro y eucalipto como materiales adsorbentes de diésel en mezclas con agua para una columna empacada; aportando así un estudio que ofrezca una potencial solución que apoye los procesos de tratamiento de aguas contaminadas.

¹ PORTAFOLIO. Sector petrolero usa 0,35 % del agua que se consume. En: El Tiempo. Bogotá D.C. 24 de Junio del 2014. Sec. Economía y Negocios.

² BAILEY, Bill, *et al.* Control del agua. En: Oilfield Review. Schlumberger. Verano, 2000. Vol. 12. Nº 3. p. 33.

³ PRIETO DÍAZ, Vicente I. Y MARTINEZ DE VILLA PEREZ, Agustín. La contaminación de las aguas por hidrocarburos: un enfoque para abordar su estudio. Instituto nacional de higiene, epidemiología y microbiología. En: Revista Cubana Hig Epidemiol. 1999. Vol.37. Nº 1. p. 13.

⁴ BAILEY, *et al.* Op. cit., p. 32.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la capacidad de adsorción del fique y aserrín de moncoro y eucalipto, en una columna empacada a presión y temperatura ambiente, para el tratamiento de agua contaminada con diésel.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Generar una curva de calibración que relacione los valores de absorbancia provenientes del espectrofotómetro de UV-VIS, con las diferentes concentraciones de diésel en agua destilada.
- Proponer la curva de adsorción que describa el comportamiento de la relación concentración de salida/concentración de entrada respecto al tiempo (C_s/C_e vs t), para los diferentes materiales evaluados en cada columna a condiciones presión y temperatura ambiente.
- Determinar cuál es el mejor adsorbente de diésel a una concentración de 0,1224% p/p a presión y temperatura ambiente.

2. MARCO TEORICO

El petróleo crudo está compuesto por diferentes fracciones, dentro de las que se pueden destacar los grupos alifáticos, aromáticos, asfaltenos (fenoles, ácidos grasos, cetonas, ésteres y porfirinas) y resinas (piridinas, quinolinas, carbazoles, sulfóxidos y amidas)⁵. Estos compuestos constituyen fuertes contaminantes debido a su cualidad recalcitrante a la biodegradación, su bioacumulación en el entorno y sus efectos perjudiciales a la salud⁶.

Al hablar de contaminación con hidrocarburos es necesario mencionar los dos eventos más comunes que pueden desencadenarla, estos son los vertimientos industriales (aguas contaminadas provenientes de refinería, aguas de producción, entre otras) y derrames accidentales o intencionados⁷. El impacto que la contaminación por hidrocarburos puede generar sobre la biodiversidad se puede dividir en tres grandes grupos de acuerdo a sus efectos:

- **Efectos directos letales:** terminan causando la muerte al impedir la respiración y cambiar la resistencia térmica de los individuos afectados.
- **Efectos directos subletales:** aunque no llega a causar la muerte, sí puede generar trastornos genéticos, bioquímicos o fisiológicos, causados por el contacto directo por ingestión.
- **Efectos indirectos:** ocurren al inducir alteraciones sobre los ecosistemas, que afectan las poblaciones tanto biológica como demográficamente⁸.

⁵ GANESH KUMAR, A. et al. Biodegradation of complex hydrocarbons in spent engine oil by novel bacterial consortium isolated from deep sea sediment. En: Bioresource Technology. Octubre, 2014, vol. 170, p. 557.

⁶ RODRIGUEZ CALVO, Alfonso. Bioremediación de aguas contaminadas con hidrocarburos mediante sistemas bio-absorbentes. Trabajo de grado doctor en Ingeniería Química. Granada: Universidad de Granada. Instituto de Investigación del Agua. 2017. p.12.

⁷ *Ibíd.*, p. 3.

⁸ MINISTERIO PARA LA TRANSFORMACIÓN ECOLÓGICA. Impacto ambiental de los hidrocarburos y recuperación de los ecosistemas. [En línea] MITECO, Madrid, España. nd. [revisado 13 enero 2019]. Disponible en internet: https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-medio-marino/plan-ribera/contaminacion-marina-accidental/impacto_ambiental.aspx.

2.1. TRATAMIENTO DE AGUAS CONTAMINADAS

El tratamiento del agua luego de su obtención o utilización es vital en la industria petrolera, independientemente del uso posterior que se le dé, ya sea tanto para la reutilización dentro de los procesos de producción por medio de inyección para proyectos de recobro mejorado, como su disposición final en cuerpos de agua superficiales o a modo disposal⁹.

Este proceso en la industria del petróleo trae consigo ventajas como la posibilidad de reciclar el agua, bajo ciertos estándares y normas de calidad, para usarla posteriormente en diversos procesos como la explotación y refinación de petróleo y sus derivados, al igual que puede ser usada en otros campos como la ganadería y agricultura, evitando así disminuir el volumen de agua tomado de fuentes naturales¹⁰. De la misma manera, el hecho de no hacer el respectivo tratamiento podría ocasionar corrosión en tuberías y equipos, taponamientos, riesgos operacionales e incumplimiento de los requisitos legales¹¹.

Teniendo en cuenta el gran número de operaciones y procesos disponibles para tratamiento de aguas, es común hablar de pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario o avanzado de aguas residuales. En general el pretratamiento tiene como objetivo remover de las aguas residuales aquellos constituyentes que pueden causar dificultades de operación y mantenimiento en los procesos posteriores o que en algunos casos no pueden tratarse juntamente con los demás componentes del agua residual.

⁹ ECOPETROL S.A. Reporte integrado de gestión sostenible. Bogotá, Colombia.: SUÁREZ GÓMEZ, Ariel. *et al*, 2017. 398 p.

¹⁰ SPENAGROUP. Tratamiento de aguas residuales en la industria del petróleo. [En línea], SPENAGROUP, Lima, Perú. nd. [revisado 1 febrero 2019]. Disponible en internet: <http://spenagroup.com/tratamiento-aguas-residuales-industria-petrolera/>

¹¹ GARCÍA NAVARRO, David Augusto y VIVAS VARGAS, Paula Andrea. Ampliación de la capacidad del sistema de tratamiento de agua de producción mediante el dimensionamiento conceptual de nuevos equipos en la estación jaguar ubicada en el bloque caracara. Tesis de grado para optar por el título de Ingeniero de Petróleos. Bogotá, Colombia.: Fundación Universidad de América. 2016. p. 49.

- **Tratamiento primario:** se refiere comúnmente a la remoción parcial de sólidos suspendidos, materia orgánica u organismos patógenos, mediante sedimentación u otro medio, y constituye un método de preparación del agua para el tratamiento secundario. Por lo general el tratamiento primario remueve alrededor del 60% de los sólidos suspendidos del agua residual cruda y un 35% a 40% de la DBO.
- **Tratamiento secundario:** se usa principalmente para remoción de DBO soluble y sólidos suspendidos, e incluye por ello, los procesos biológicos de lodos activados, filtros percoladores, sistemas de lagunas y sedimentación.
- **Tratamiento terciario o avanzado:** supone generalmente la necesidad de remover nutrientes para prevenir la eutrofización de las fuentes receptoras o de mejorar la calidad de un efluente secundario con el fin de adecuar el agua para su reúso¹².

El tratamiento de aguas residuales en la industria petrolera se basa generalmente en: remoción del aceite, desinfección, desalinización y tratamiento por membranas. Los aceites logran ser retirados de las aguas contaminadas con ayuda de procesos como los de: extracción, hidrociclón, separación por platos corrugados, adsorción, centrifugación, flotación por gas y ozono/peróxido de hidrógeno¹³.

2.2. RESIDUOS VEGETALES USADOS COMO ADSORBENTES

Actualmente se buscan materiales que logren eliminar rastros de hidrocarburos en corrientes de agua contaminada, a través de métodos como la filtración o la adsorción, para esto se utilizan medios adsorbentes. Idealmente se busca que estos

¹² JAIMES, Diana y PICO, María. Diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales y de producción evaluando las diferentes alternativas nacionales y extranjeras- aplicación Campo Colorado. Tesis para optar por el título de Ingeniero de Petróleos. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander. 2009. p. 21- 22.

¹³ SPENA GROUP. Op. cit.

materiales sean desechos naturales ya que se aprovecharían residuos que no tienen ningún uso final, por lo que su adquisición representa un bajo costo.

2.2.1. Fique o cabuya de fique: son las fibras provenientes de la planta de fique de la especie *Furcraea* spp. La fibra extraída constituye un 4% máximo del peso total de la hoja de la planta y la estructura principal de las paredes celulares del tejido vegetal, la cual está compuesta por celulosa e impurezas como ligninas y pigmentos¹⁴. Este material supone una ventaja, ya que Colombia es el mayor productor de fique en el mundo, y los departamentos con mayor producción en el país son Cauca, Nariño, Santander, Antioquia y Boyacá¹⁵.

2.2.2. Eucalipto o Eucalyptus: es un árbol de gran desarrollo, con madera de color rojo claro, suave, liviana y moderadamente durable en contacto con el suelo. La densidad de la madera puede variar en promedio entre 0,4 y 0,59 g/cm³, pero este valor depende principalmente de la edad y el sitio de la plantación. Esta madera es fácil de impregnar y trabajar, pero resulta difícil secarla. El crecimiento rápido y la capacidad de rebrote de esta especie le confieren gran potencial para la producción de madera para leña. Cuenta con un poder calorífico de 18.199 kJ/kg¹⁶.

2.2.3. Moncoro o *Cordia gerascanthus* L.: es un árbol que puede alcanzar hasta los 30 m de altura, con crecimiento moderado de 0,7 a 1,6 m al año. La madera de este árbol es dura, pesada y valorada por su flexibilidad y fuerza elástica. Su densidad puede variar entre 0,75 a 0,9 g/cm³. Tiene un grano fino, con albura de color amarillo paja, además de un duramen negruzco¹⁷.

¹⁴ Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia. El fique, agronomía y transformación. En: Guía ambiental del subsector fiquero. Enero, 2006. vol. 2, p. 25.

¹⁵ OVALLE, Sergio; BLANCO, Cristian y COMBARIZA, Marianny. Síntesis in situ de nanopartículas de plata sobre fibras de fique. En: Revista Colombiana de Química. Abril, 2013. vol. 42, no. 1, p. 30-31.

¹⁶ HERNÁNDEZ, Raúl; RODAS, Carlos; OSPINA, Carlos; URREGO, John; GODOY, José y ARISTIZÁBAL, Fabio. El Eucalipto. En: Cenicafé. Abril, 2006. vol. 1, no. 1, ISBN: 958 97441-7-6.

¹⁷ El Semillero. Moncoro. Adaptación, usos, madera, vivero, rendimientos y silvicultura de 95 especies [en línea], n.d [revisado 13 enero 2019]. Disponible en Internet: <http://elsemillero.net/nuevo/semillas/moncoro.html>.

3. ESTADO DEL ARTE

En 2006, en España, Cambiella evaluó el rendimiento del aserrín de eucalipto como medio filtrante para el tratamiento de emulsiones de aceite en agua y se estudió el efecto de las condiciones de operación como la influencia del caudal, la altura del lecho y la temperatura de operación, utilizando un aceite de corte proveniente de operaciones de metalurgia. Se logró eliminar más del 99% del contenido de aceite en la corriente de entrada, demostrando, que es posible utilizar absorbentes de bajo costo como el aserrín en el tratamiento de emulsiones de aceite en agua¹⁸.

Para 2013, Baldeón presentó los primeros resultados experimentales obtenidos del estudio de la fibra de cabuya blanca como agente reactivo para la remoción de metales pesados, considerando el tiempo de contacto de la fibra y las condiciones de filtrado. Se encontró que esta fibra natural retiene un porcentaje considerable de metales pesados, por lo que se lo considera como una excelente alternativa de limpieza de aguas contaminadas con estas sustancias¹⁹. Teniendo en cuenta que los hidrocarburos poseen concentraciones significativas de metales pesados, se espera que la cabuya blanca ayude a retener estas sustancias; además, esta fibra contiene un porcentaje significativamente alto lignina, la cual es un polímero orgánico complejo con propiedades hidrofóbicas²⁰. Sumado a esto, cuenta con una alta presencia en la geografía colombiana, llegando a ser esta la primera productora de fique a nivel mundial, presentando además un bajo costo de compra²¹. Por lo

¹⁸ CAMBIELLA, Angel, *et al.* Tratamiento de emulsiones de aceite en agua: rendimiento de un filtro de lecho de aserrín. En: Diario de materiales peligrosos. 17 de Abril del 2006. Vol 131(1–3), p.195–199.

¹⁹ BALDEÓN CAJO, José Enrique. Estudio de retención de metales pesados en aguas sintéticas (preparadas en el laboratorio) utilizando como lecho filtrante la fibra de cabuya furcraea andina como alternativa de bioremediación. Tesis para optar por el título de Ingeniero Ambiental. Riobama. Ecuador.: Universidad Nacional de Chimborazo. 2013, p.116.

²⁰ Atlas de historia vegetal y animal. Tejidos y órganos vegetales. Lignina [En línea]. Departamento. de Biología Funcional y Ciencias de la Salud. España: Universidad de Vigo. 2018. (Recuperado el 18 de enero del 2019). Disponible en: <https://mmegias.webs.uvigo.es/2-organos-v/ampliaciones/lignina.php>.

²¹ MORALES RUBIANO, María Eugenia y PELÁEZ PARADA, Nancy Stella. El estudio de la cadena productiva del fique. En: Revista de Ciencias Administrativas y Sociales. 2002, Vol 20, p. 121–134.

anterior, se piensa que este material podría ser viable para la remoción de hidrocarburos, motivando el desarrollo de estudios referentes a esto.

En 2017, Corredor evaluó la capacidad de adsorción de tres materiales diferentes: el aserrín, la cascarilla de arroz y el estropajo natural, mediante la metodología de la norma ASTM F726-06, en la cual se determinó que el aserrín es el mejor adsorbente usado para la remoción de gasolina y diésel. Además, se estableció como análisis de un proceso experimental, que no existe una relación directa entre el tamaño de grano y la cantidad de hidrocarburo adsorbido por el material, ya que el rendimiento de adsorción de este depende mayormente de las características fisicoquímicas de cada uno de los adsorbentes²².

Los residuos de la industria manufacturera de madera cuentan con un significativo potencial adsorbente debido a su procedencia de origen vegetal, su alto porcentaje de lignina y la facilidad de su consecución en las grandes carpinterías, en el caso de Bucaramanga, Santander, uno de los materiales más trabajados es el moncoro, además de que al tratarse de un residuo que hasta el día de hoy no tiene un precio comercial, impulsa a su aprovechamiento, en este caso como material adsorbente.

En 2017, Villabona evaluó el uso de aserrín en una columna de adsorción de Diesel en solución acuosa, variando la cantidad de biomasa y el caudal de alimentación, logrando un equilibrio de la columna a los 600 minutos, lo que significa una alta saturación del aserrín. Además, se encontró presencia de grupos hidroxilo y carbonilo en el material, los cuales favorecen la disposición de centros activos durante la adsorción del diésel. Se describió el proceso de adsorción de diésel con el modelo de Thomas²³.

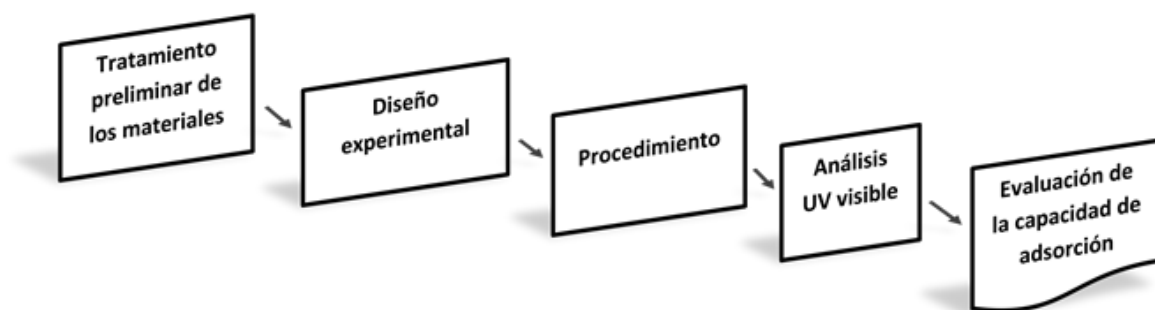
²² CORREDOR, Karla. Evaluación del rendimiento de adsorción de materiales como el aserrín, cascarilla de arroz y estropajo natural, en diferentes tamaños de grano, para la contingencia de derrames de hidrocarburos en ambientes acuáticos. Tesis para optar por el título de Ingeniero Químico. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander. 2017. p.49.

²³ VILLABONA, Ángel, et al. Adsorción de diésel en solución acuosa sobre aserrín cedro (*Cedrela odorata* L.) en columna de lecho fijo. En: Investigaciones Andina. 2017. Vol. 19, no. 35, p. 31-44.

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Se propone dividir el desarrollo del trabajo en cinco etapas (5), las cuales se presentan en el siguiente diagrama de flujo y se da explicación a ellas posteriormente:

Figura 1. Etapas para la realización del proyecto.



4.1. TRATAMIENTO PRELIMINAR DE LOS MATERIALES

4.1.1. Adquisición de materiales. Este primer paso se realizó conociendo y estudiado las propiedades y características de los materiales seleccionados que favorecen su uso e implementación en la investigación desarrollada. Se decidió estudiar el comportamiento del fique o cabuya blanca, esta fibra se adquirió en la plaza central de la ciudad de Bucaramanga, donde se pueden encontrar diferentes tamaños de diámetro. Otro tipo de material seleccionado para este caso de estudio, fueron los residuos de madera de moncoro, provenientes de la industria manufacturera de madera de la zona del centro de la ciudad de Bucaramanga, en donde este tipo de madera es la que más predomina para su trabajo. Igualmente, se trabajó con madera de eucalipto, el cual se obtuvo en las zonas rurales del municipio de Suaita en el Departamento de Santander. El diésel proviene de la estación de servicio Terpel Santa Marta, ubicada en la ciudad de Bucaramanga, el

cual se mezcló con agua destilada para generar la mezcla líquida utilizada en el desarrollo de este trabajo.

4.1.2. Reducción de tamaño de los materiales adsorbentes. Se introdujeron cada uno de los materiales por separado en el molino Wiley Laboratory Mill (standard Model No. 3, Arthur H. Thomas Co.) de donde se obtuvieron materiales particulados que pasaron por una malla de diámetro de 1 mm antes de salir del molino.

4.1.3. Clasificación por tamaño. Se hizo pasar el material resultante del proceso de reducción de tamaño por un juego de 7 tamices según la norma ASTM E11 – 17²⁴, con el propósito de clasificar los materiales de acuerdo con su tamaño de partícula.

4.1.4. Lavado de las partículas. Se realizó un lavado a cada uno de los materiales por separado en un recipiente con agua destilada que lograra cubrir el material, se agitó esporádicamente y se cambiaba el agua cada 30 minutos, repitiendo este proceso 4 veces, siguiendo lo propuesto por Ojeda²⁵. Posteriormente se hizo un lavado con etanol durante 6 horas en un equipo de extracción, cambiando el solvente cada hora. Todo esto con el propósito de eliminar las sustancias que pudieran llegar a ser solubilizadas o arrastradas por el agua en la columna al momento de desarrollar las pruebas experimentales, y de esta forma evitar posibles alteraciones en los resultados de las pruebas analíticas.

4.1.5. Secado de las partículas. Se pusieron los materiales adsorbentes dentro de un horno de laboratorio durante 24 horas a una temperatura de 80°C según lo

²⁴ ASTM INTERNATIONAL. Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves. ASTM E11-17. West Conshohocken, PA, 2017.

²⁵ OJEDA JARAMILLO, José R. Remoción de color en aguas residuales industriales por biosorción con residuos agrícolas e industriales. Tesis para optar por el título de Ingeniero en Saneamiento Ambiental. Santa Clara, Cuba.: Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. 2011. p. 72.

propusieron Jiménez y Padilla²⁶. Se realizó el secado de los materiales adsorbentes, con el propósito de incrementar la resistencia biológica de estos²⁷.

4.2. LEY DE LAMBERT-BEER:

Teniendo en cuenta que en el desarrollo de esta investigación se trabajarían relaciones entre la absorbancia arrojada por el espectrofotómetro UV-VIS y la concentración de diésel en agua, se hacía necesario conocer las restricciones que regirían el proceso de construcción de la curva de calibración y por ende de las muestras llevadas ante este equipo. Con ayuda de las limitaciones sugeridas por la ley de Lamber-Beer, se corroboró que las concentraciones que se fueran a usar no superaran valores del orden de 10^{-2} M. Además, proporcionó una noción de la linealidad con la que debería contar la curva de calibración descrita por la siguiente ecuación²⁸:

$$A = a b c \quad (1)$$

Donde:

- A= Absorbancia
- a= Absortividad ($L \cdot g^{-1} \cdot cm^{-1}$)
- b= Trayectoria de la radiación a través de la muestra (cm)
- c= Concentración (g/L)

Como se puede observar, la absorbancia es directamente proporcional a la concentración.

²⁶ JIMÉNEZ VILLADIEGO, María Elvira y PADILLA GONZÁLEZ, Gustavo Alfonzo. Evaluación del potencial de adsorción del aserrín para remover aceites pesados en cuerpos de agua a escala laboratorio. Tesis para optar por el título de Ingeniero Químico. Cartagena, Colombia.: Universidad de Cartagena. 2012. p. 45.

²⁷ FRANCO BURGOS, Amarilis (n.d.). Secado de madera. Retrieved from http://webdelprofesor.ula.ve/forestal/are/materias/Industrias_Forestales/Gu%EDas-de-estudio_IND/Secado/gu%EDa de secado.pdf.

²⁸ SERRANO MARTINEZ, José. Instrumentación y métodos de análisis químico. Curso. Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena. España. nd. p. 12.

4.3. DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN:

Para lograr identificar correctamente los valores de concentración a la salida de la columna de adsorción durante el desarrollo experimental, como primera medida se generó una curva que lograra asociar el valor de absorbancia de luz generado por el espectrofotómetro UV-VIS, con la concentración de diésel en cada muestra. Para generar esta curva primero se identificó el valor de la concentración de diésel en agua con que sería alimentada la columna, que en este caso fue de 0,1224% p/p. Posteriormente se prepararon 2 sets de 14 muestras de diésel en agua destilada, uno con Texapon al 70% de pureza (a una relación molar 1/1 con la cantidad de diésel de la muestra más concentrada) y el otro sin surfactante, con concentraciones que iban desde 0,1224 hasta 0,0087% p/p, con tamaños de paso de 0,0087 % p/p y una agitación de 1000rpm durante 20 minutos con ayuda de un agitador magnético (HP 220, Hot Plate/Stirrer). Tan pronto cada una de estas muestras fue preparada, se llevó inmediatamente al espectrofotómetro UV-VIS (SPECORD 210 PLUS de Analytik Jena AG), el cual arrojó un espectro de absorbancia que permitió identificar el pico más representativo a una longitud de onda determinada. Con los datos de concentración de diésel en agua conocidos y los respectivos valores de absorbancia obtenidos a esta longitud de onda, se construyeron las curvas de calibración respectivas (Absorbancia vs. Concentración, figura 3 y Anexo A).

4.4. DISEÑO EXPERIMENTAL:

El montaje experimental desarrollado se basó en el prototipo propuesto por Rincones, *et al*²⁹. Para el desarrollo de las pruebas experimentales se realizaron un total de 6 experimentos, basado en un diseño de 3 corridas (una por cada material) con 2 repeticiones, en donde se tendrá:

²⁹ RINCONES, Félix; MARFISI, Shirley; DANGLAD, Ángel y SALAZAR, Victoria. Adsorción de hidrocarburos de petróleo en agua mediante una columna empacada de bagazo de caña de azúcar. En: Saber: revista científica del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente. Venezuela. Septiembre del 2015. Vol 27. Nº 3. p.14.

- Variable independiente: El tipo de material a utilizar como relleno de la columna.
- Variable dependiente: La concentración de hidrocarburo en agua a la salida de la torre.

4.5. PROCEDIMIENTO:

Se analizó el comportamiento de la curva de calibración y se determinó cuál de los dos sets planteados anteriormente (con y sin surfactante) lograban acercarse a una tendencia lineal según lo propuesto por Lambert- Beer para este tipo de curvas. Una vez seleccionado el mejor set, se prepararon inicialmente 1000 mL de una mezcla de diésel en agua destilada en una proporción del 0,1224% p/p, con ayuda de un agitador magnético HP 220, Hot Plate/Stirrer, a una velocidad de giro de 1.000 rpm durante 20 minutos para mantener una mejor distribución del diésel en el medio acuoso según lo sugerido por Danglad, *et al*³⁰.

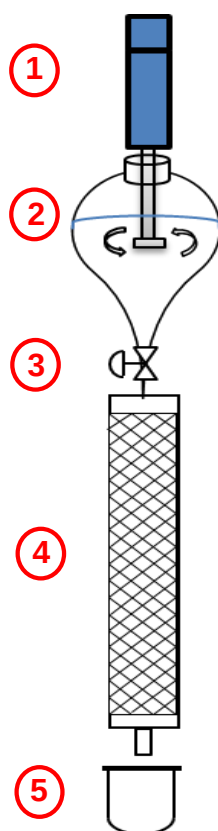
Posteriormente se relleno una columna de 2.88 cm de diámetro y 26.5 cm de altura del lecho con el primer material adsorbente a evaluar, se hizo circular por el lecho agua destilada por goteo a 0,33 mL/s durante 4 horas para que este se mojara completamente, evitando la retención de agua y el arrastre de material orgánico del lecho al iniciar cada corrida. Una vez pasaron los 20 minutos de agitación para la mezcla de diesel en agua, esta fue ingresada inmediatamente en una pera de decantación, la cual permitía el paso de la mezcla a través de una válvula que mantenía un flujo constante a la entrada de la columna de 0,33 mL/s³¹. Ocasionalmente, tratando de mantener un nivel de altura de líquido constante en la pera de decantación, se preparaban 250 mL de la mezcla, alrededor de 20 veces buscando mantener un flujo constante durante 5 horas. El líquido contenido en la pera de decantación siempre se mantuvo agitado a 1000 rpm con la ayuda de un

³⁰ DANGLAD, José, *et al*. Partículas hidrofobadas de bagazo de caña de azúcar para el tratamiento de hidrocarburos en agua. En: Saber: revista científica del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente. Marzo de 2013, vol. 25. no1, p.99.

³¹ Ibid., p. 102.

Ultra Turrax, asegurando homogeneidad en la mezcla a lo largo del proceso. Luego, se recolectaron muestras durante este mismo tiempo cada 15 minutos para llevarlas al espectrofotómetro UV–VIS. Una vez finalizado esto, se realizó un lavado de la columna con agua y jabón, y se preparó toda la instrumentación para efectuar la repetición de la corrida, brindando de esta forma más exactitud en los resultados. Todo este procedimiento fue realizado de igual forma para los dos materiales restantes. En la figura 2, se puede apreciar el montaje experimental anteriormente descrito.

Figura 2: Montaje experimental.



- | | |
|-------------------------------------|-------------------------------|
| 1. Ultra-Turrax | 4. Columna empacada. |
| 2. Pera de decantación de 2 litros. | 5. Recipiente de recolección. |
| 3. Válvula de paso. | |

4.6. ANÁLISIS UV-VIS:

Las muestras recolectadas durante el proceso experimental fueron llevadas a un estudio de espectrofotometría UV-VIS, basados en una investigación desarrollada por la Universidad de San Carlos de Guatemala, ya que estas medidas espectrofotométricas con radiación UV-VIS son útiles para la detección de grupos cromóforos presentes en el diésel³².

4.7. CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA DE CAPACIDAD DE ADSORCIÓN VS TIEMPO:

Con ayuda de la curva de calibración, se logró transformar los datos de absorción arrojados por el análisis UV-VIS a valores de concentración de diésel remanente en agua. Luego se hizo una relación de cada una de las concentraciones obtenidas respecto a la concentración de alimentación, permitiendo así la construcción de una curva que refleje el comportamiento de la relación de concentraciones respecto al tiempo de muestreo para cada uno de los materiales. Adicionalmente, se determinó la línea de tendencia que mejor represente el comportamiento de las curvas de adsorción a condiciones de presión y temperatura ambiente.

³² ARÉVALO HIDALGO, Ana Graciela. Evaluación de un método por espectroscopía UV-VIS para la detección de contaminantes orgánicos en agua. Tesis para optar por el título de Ingeniero Químico. Ciudad de Guatemala, Guatemala.: Universidad de San Carlos de Guatemala. 2006. p. 17.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. SELECCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA:

En la tabla 1, se puede apreciar la distribución de masas por tamaños de cada uno de los materiales una vez fueron efectuados los procesos de tamizaje, de las cuales se seleccionaron convenientemente aquellas masas que quedaron retenidas sobre malla 50 (300 micras) luego de haber pasado por malla 40 (425 micras), ya que estas representaron más del 20% del peso de material inicial.

Tabla 1. Cantidad de material por tamaños de partícula.

		Número de malla o tamiz							Peso total (g)
		40	50	60	70	80	100	120	
Materiales	Cantidad Moncoro (g) *(%)	90,7634 (18%)	115,9754 (23%)	88,2422 (17,5%)	70,5937 (14%)	63,0301 (12,5%)	40,3393 (8%)	35,2969 (7%)	504,2409
	Cantidad Eucalipto (g) *(%)	107,3593 (19%)	135,6117 (24%)	104,5340 (18,5%)	80,8020 (14,3%)	59,3301 (10,5%)	43,5087 (7,7%)	33,9029 (6%)	565,0487
	Cantidad Fique (g) *(%)	62,3675 (18,5%)	65,7388 (19,5%)	58,9963 (17,5%)	53,9395 (16%)	38,7690 (11,5%)	30,3410 (9%)	26,9697 (8%)	337,1218

*(%) Representan los porcentajes en peso de la cantidad de material retenido en cada malla.

Después de esto, se verificó que el tamaño de partícula seleccionado no provocara formación de canalizaciones o efectos de pared sobre la columna; se calculó la relación entre el diámetro de partícula y el diámetro de la columna, buscando que este valor fuese mayor a 50, según lo descrito por Ortiz en el 2002³³.

$$\frac{D_c}{D_p} > 50 \quad (2)$$

³³ ORTIZ RIVERA, Arturo; RAMÍREZ ZAMORA, Rosa María y DURÁN MORENO, Alfonso. Pruebas RSSCT con mini-columnas de carbón activado para remover materia orgánica natural (MON) presentes en aguas. En: Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 2002.

- D_c = Diámetro de columna.
- D_p = Diámetro de partícula.

$$\frac{2,8 \cdot 10^{-2} m}{4,25 \cdot 10^{-4} m} = 65,9 > 50$$

Se puede evidenciar que la columna empleada cumple con este criterio de operación, así como fue corroborado también en la tesis de grado desarrollada por Danglad, *et al*³⁴.

5.2. ANÁLISIS DE LA CAÍDA DE PRESIÓN DE LA COLUMNA:

Basados en la ecuación de Ergun, se evaluó el efecto de la caída de presión generada por lecho empacado en la columna.

$$\frac{-\Delta p^+}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon_m)^2}{\varepsilon_m^3} \frac{\mu u^+}{(\Phi_s d_p)^2} + 1.75 \frac{1-\varepsilon_m}{\varepsilon_m^3} \frac{\rho (u^+)^2}{\Phi_s d_p} \quad (3)$$

Donde:

Δp^+ = pérdida de presión manométrica, debida al rozamiento

L = altura del lecho

ε_m = porosidad media del lecho o frac. volumétrica de huecos

μ = viscosidad del fluido

U^+ = velocidad superficial del líquido, calculada a sección total libre

Φ_s = factor de esfericidad

d_p = tamaño de partícula

ρ = densidad del fluido

³⁴ Danglad, et al. Op. Cit., p. 100.

De esta manera se obtuvo como resultado una caída de presión para cada columna con los distintos materiales adsorbentes, que pueden ser observados en la tabla 2. Decidiéndose así aprovechar el efecto de la gravedad para hacer circular el fluido.

Tabla 2. Parámetros para el cálculo de la caída de presión de cada material

		Materiales		
		Moncoro	Eucalipto	Fique
Parámetros	ΔP^+ (N/m ²)	977,7	651,7	663,46
	L (m)	0,265	0,265	0,265
	ε_μ	0,479	0,520	0,35
	μ (kg/(m·s))	$8,910 \cdot 10^{-4}$	$8,910 \cdot 10^{-4}$	$8,910 \cdot 10^{-4}$
	U^+ (m/s)	$5,070 \cdot 10^{-4}$	$5,070 \cdot 10^{-4}$	$5,070 \cdot 10^{-4}$
	$\Phi\sigma$	0,5	0,5	0,35
	dp (m)	$4,25 \cdot 10^{-4}$	$4,25 \cdot 10^{-4}$	$4,25 \cdot 10^{-4}$
	ρ (kg/m ³)	955	955	955

5.3. CURVA DE CALIBRACIÓN:

Luego de analizar el comportamiento de las dos curvas de calibración (set 1 y 2) propuestos en la sección 4.3 de este libro, se decidió descartar el uso de surfactante sobre la mezcla, debido al comportamiento de la curva de calibración de la figura 5 (anexo A), en donde se corrobora el no cumplimiento de la linealidad propuesta por Lambert-Beer, esto se debió posiblemente a la alta presencia de anillos bencénicos en el Texapon que lograban interferir ocasionalmente con el diésel en las lecturas realizadas por el espectrofotómetro UV-VIS³⁵; seleccionando únicamente la mezcla sin surfactante para el análisis de resultados en esta investigación, donde se logró apreciar un espectro de absorbancia con picos representativos de los hidrocarburos aromáticos presentes en el diésel³⁶, a una longitud de onda de 339 nm. A pesar de

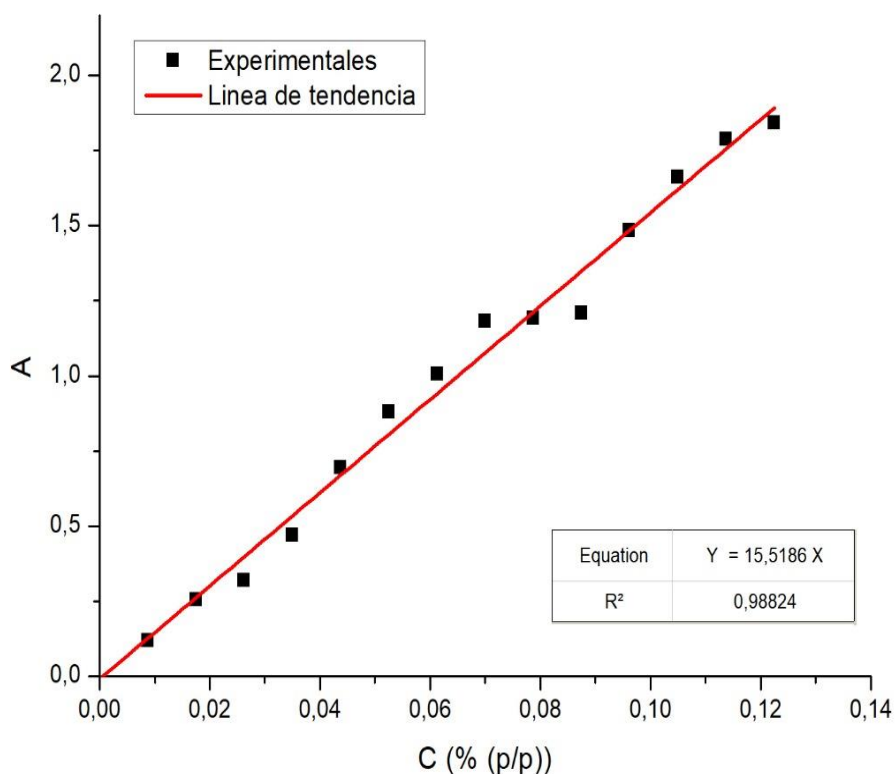
³⁵ CASTRO PARRA, Neidy Yamile, *et al.* Reacción de saponificación: fabricación del jabón. En: Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. 2009.

³⁶ AREVALO. Op. Cit., p. 15.

que fue posible apreciar otros picos a longitudes de onda inferiores, estos fueron descartados debido a la interferencia que se generaba al hacerle el análisis UV-VIS al agua destilada a la salida de cada una de las columnas antes de iniciar la toma de muestras, las cuales mostraban valores altos de absorbancia a longitudes de onda inferiores a 300 nm tal como lo muestra la figura (anexo B). Se presume que estas interferencias se debieron a material del lecho que era arrastrado por el agua.

En la figura 3 se puede apreciar la curva de calibración, en esta se demuestra el cumplimiento de linealidad aludida a la relación de absorbancia vs concentración en la aplicación de la ley de Lambert-Beer.

Figura 3: Curva de calibración a 339 nm.



5.4. TRANSFORMACIÓN DE ABSORBANCIA A CONCENTRACIÓN:

En la tabla 2 se observan los datos de concentración durante las 5 horas de muestreo (300 minutos), obtenidos con ayuda de la ecuación que describe la línea de tendencia de la curva de calibración, a partir de los valores de absorbancia promediados de las muestras tomadas de cada material y su respectiva repetición.

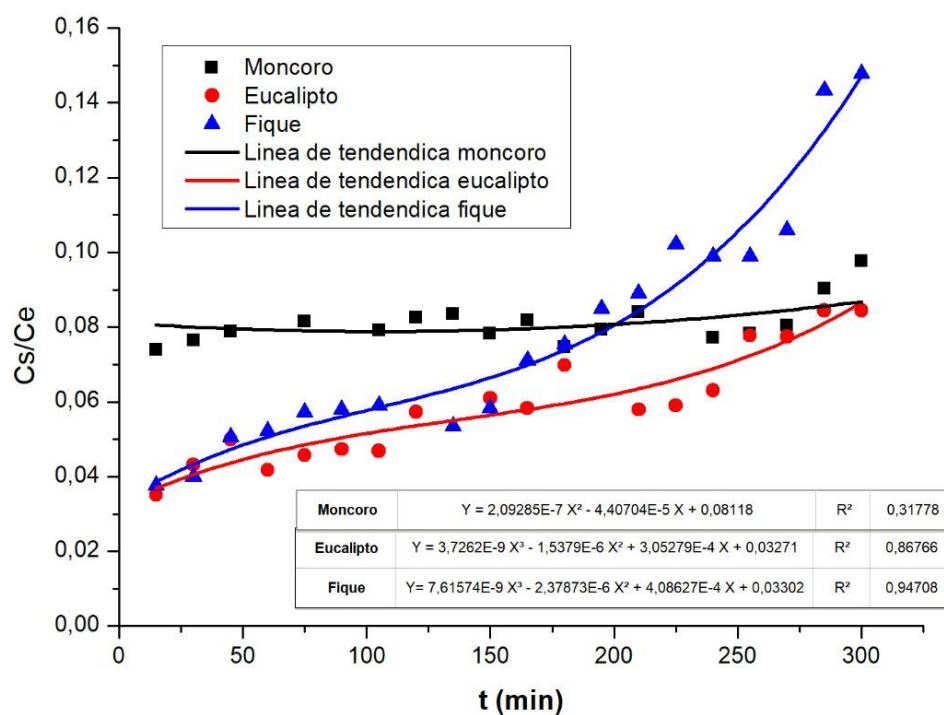
Tabla 3: Transformación de datos de absorbancia a concentración.

t (min)	Eucalipto		Moncoro		Fique	
	A	C (%p/p)	A	C (%p/p)	A	C (%p/p)
0	0,0809	0,0052	0,0141	0,0009	0,0141	0,0009
15	0,0668	0,0043	0,1500	0,0097	0,0715	0,0046
30	0,0821	0,0053	0,1452	0,0094	0,0760	0,0049
45	0,0950	0,0061	0,1496	0,0096	0,0962	0,0062
60	0,0793	0,0051	0,1993	0,0128	0,0993	0,0064
75	0,0868	0,0056	0,1625	0,0105	0,1088	0,0070
90	0,0900	0,0058	0,2048	0,0132	0,1100	0,0071
105	0,0891	0,0057	0,1505	0,0097	0,1123	0,0072
120	0,1089	0,0070	0,1569	0,0101	0,1607	0,0104
135	0,1476	0,0095	0,1586	0,0102	0,1015	0,0065
150	0,1159	0,0075	0,1485	0,0096	0,1106	0,0071
165	0,1107	0,0071	0,1556	0,0100	0,1349	0,0087
180	0,1517	0,0098	0,1417	0,0091	0,1433	0,0092
195	0,1981	0,0128	0,1507	0,0097	0,1615	0,0104
210	0,1102	0,0071	0,1595	0,0103	0,1690	0,0109
225	0,1121	0,0072	0,2148	0,0138	0,1942	0,0125
240	0,1199	0,0077	0,1468	0,0095	0,1880	0,0121
255	0,1476	0,0095	0,1854	0,0119	0,1880	0,0121
270	0,1472	0,0095	0,1714	0,0110	0,2012	0,0130
285	0,1605	0,0103	0,1452	0,0094	0,2722	0,0175
300	0,1605	0,0103	0,1352	0,0087	0,2806	0,0181

5.5. CAPACIDAD DE ADSORCIÓN:

En la figura 4 se logra apreciar el comportamiento de los 3 materiales evaluados para la adsorción de diésel en agua, en fracciones de minutos a lo largo de 5 horas, a condiciones de presión y temperatura ambiente, proporcionando un caudal continuo de entrada a la columna de 0,33 mL/s.

Figura 4: Relación de concentración vs tiempo.



Ce = Concentración de entrada, Cs = Concentración de salida, t = tiempo.

En esta gráfica, se logra apreciar cómo el moncoro empieza removiend el 92,60% y termina removiend el 90,24% del diésel presente en él afluente, además de presentar una tendencia poco variable a lo largo del tiempo de prueba; también se puede ver el comportamiento de adsorción del eucalipto, el cual empieza

removiendo el 96,48% y termina removiendo el 91,55% del diésel suministrado al afluente, mostrando una pendiente levemente creciente que simboliza con qué rapidez se fue saturando este lecho; finalmente se logra visualizar el comportamiento del fique, este comienza removiendo un 96,24% y finaliza con una remoción del 85,23% del diésel alimentado en él afluente, además de ser el material que presento una mayor tendencia de crecimiento en su curva de adsorción, lo que lo clasifica como el más rápido de estos tres materiales en tender a la saturación.

En ese mismo sentido, de los tres materiales evaluados, el eucalipto termina teniendo un promedio de remoción a lo largo de las 5 horas del 93,91% del diésel alimentado a la columna de adsorción, mientras que el fique y el moncoro logran un promedio de remoción de 92,19% y 91,90% respectivamente.

Para determinar cuál es el mejor material adsorbente, se procede a desarrollar una ecuación polinómica empírica que permita mostrar el comportamiento de los resultados experimentales a lo largo del tiempo de corrida, logrando así una ecuación de segundo orden para el moncoro y de tercer orden para el fique y el eucalipto, reflejadas en la figura 4. Luego de analizar esta gráfica, se logra ver que la gran mayoría de los puntos del eucalipto se encuentran por debajo de los puntos asociados a los demás materiales evaluados, lo cual indica una mayor capacidad de retención del hidrocarburo en el material durante el tiempo de experimentación; a pesar de que la diferencia del promedio porcentual de remoción entre el eucalipto el moncoro y el fique no es tan alta, el eucalipto es quien logra remover hasta dos puntos porcentuales mas que los otros dos materiales evaluados, mostrando así los indicios suficientes para concluir que el eucalipto es el mejor material adsorbente; esto puede deberse a las propiedades oleofílicas con las que este cuenta, lo cual le permite una mayor afinidad con el diésel al ser este un aceite combustible, tal como

ocurrió en la investigación desarrollada por Jiménez y Padilla en 2012, en la que el aserrín de eucalipto fue quien logro el porcentaje de remoción más alto³⁷.

Finalmente se determino el porcentaje de error en que se puede incurrir si se deciden usar las líneas de tendencia propuestas anteriormente para describir el comportamiento de la adsorción de cada uno de los materiales estudiados.

$$\%Error_i = \frac{|valor\ experimental - valor\ linea\ de\ tendencia|}{valor\ experimental} * 100 \quad (4)$$

$$\%Error\ promedio = \frac{\sum_{i=1}^n \%Error_i}{n} \quad (5)$$

Donde:

- i es el contador para cada una de las muestras analizadas
- n representa la cantidad de muestras experimentales tomadas, n=21.

Los resultados de los cálculos planteados anteriormente se encuentran en la tabla 4, en donde se puede evidenciar que la linea de tendencia que mejor representa los valores experimentales es la del moncoro, con el error promedio más bajo de 11,6%.

Tabla 4. Porcentaje de error de los valores experimentales respecto a la linea de tendencia (C_s/C_e vs t).

Error promedio columna de moncoro	11,6%
Error promedio columna de eucalipto	14,6%
Error promedio columna de fique	13,1%

³⁷ JIMÉNEZ Y PADILLA. Op. Cit. p. 77.

5.6. MARCO LEGAL:

Los valores límites máximos permisibles para vertimiento puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público, se encuentran regidos en la ley colombiana según la resolución 0631 del 2015, en donde se tiene 0,0015% p/p como valores máximos permitidos de vertimiento de aceites.

En la tabla 5 se pueden apreciar los valores de concentración mas bajos, obtenidos para cada material en comparación con lo que dicta la ley.

Tabla 5. Comparación de las concentraciones más bajas obtenidas con los valores permitidos para vertimientos.

	Materiales		
	Moncoro	Eucalipto	Fique
Concentración más baja a la salida (%p/p)	0,0097	0,0043	0,0046
Vertimiento legal máximo de aceites (%p/p)	0,0015	0,0015	0,0015
Número de veces por encima del límite permitido	6,4667	2,8667	3,0667

Como se puede observar ninguno de los materiales estudiados logra cumplir con la normatividad colombiana para vertimientos en aguas superficiales, llegando a estar aproximadamente de 3 a 6 veces por encima de lo permitido.

6. CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos en la curva de calibración que relacionan la concentración de diésel en agua con la absorbancia arrojada por el espectrofotómetro UV-VIS a 339 nm, cuentan con un comportamiento lineal para mezclas sin el uso del surfactante texapon 70. Demostrando así, que al evaluar concentraciones por debajo de 0,1224% p/p, se observa una conducta según lo descrito en la ecuación de Lambert-Beer (1), para la construcción de este tipo de líneas.
- La grafica que relaciona las concentraciones de entrada y salida respecto al tiempo, evidencia un porcentaje de remoción de diésel en agua relativamente alto para los tres materiales, sin embargo, es el eucalipto quien presenta un mejor comportamiento de adsorción, pues este fue quien presentó los valores más bajos de concentración en la salida del lecho a lo largo del tiempo, llegando a remover en promedio 1,72 y 2,01 puntos porcentuales por encima del fique y moncoro respectivamente; esto convierte al eucalipto en el mejor material adsorbente bajo las condiciones experimentales de esta investigación.
- Los resultados de concentración promedio a la salida de la columna de adsorción obtenidos por el eucalipto durante los primeros 165 minutos, muestran valores del orden de 10^{-3} , que, aunque son cercanos a lo estipulado por la resolución N° 0631 del 17 de marzo del 2015 del Ministerio de Ambiente, no logran estar dentro de los valores de concentración de aceites permitidos por la ley colombiana de 0,0015% p/p para vertimientos industriales a cuerpos de agua superficiales y alcantarillado público.

BIBLIOGRAFÍA

AJMAL, Mohammed, KHAN, Akhtar, AHMAD Shamim, AHMAD Anees. Role of sawdust in the removal of Cu (II) from industrial waste. En: Water Research; Octubre,1998. vol. 32, no.10, p. 3085–3091.

ÁLVAREZ VALENCIA, Didier Andrés. Las especies vegetales promisorias: caso del departamento de Antioquia. Tesis para optar por el título de Ingeniero Agroforestal. Medellín, Colombia. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Escuela de Ciencias Agrícolas y del Medio Ambiente (ECAPMA). 2014. 45 p.

ARÉVALO HIDALGO, Ana Graciela. Evaluación de un método por espectroscopía UV-VIS para la detección de contaminantes orgánicos en agua. Tesis para optar por el título de Ingeniero Químico. Ciudad de Guatemala, Guatemala.: Universidad de San Carlos de Guatemala. 2006. p. 17.

ASTM INTERNATIONAL. Standard Guide for Sampling Oil/Water Mixtures for Oil Spill Recovery Equipment. ASTM F1084-08, West Conshohocken, PA, 2018. DOI: 10.1520/ F-1084-08.

ASTM INTERNATIONAL. Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves. ASTM E11-17. West Conshohocken, PA, 2017.

Atlas de historia vegetal y animal. Tejidos y órganos vegetales. Lignina [En línea]. Departamento. de Biología Funcional y Ciencias de la Salud. España: Universidad de Vigo. 2018. (Recuperado el 18 de enero del 2019). Disponible en: <https://mmegias.webs.uvigo.es/2-organos-v/ampliaciones/lignina.php>.

BAILEY, Bill, *et al.* Control del agua. En: Oilfield Review. Schlumberger. Verano, 2000. Vol. 12. Nº 3. p. 33.

BALDEÓN CAJO, José Enrique. Estudio de retención de metales pesados en aguas sintéticas (preparadas en el laboratorio) utilizando como lecho filtrante la fibra de cabuya furcraea andina como alternativa de bioremediación. Tesis para optar por el título de Ingeniero Ambiental. Riobamba. Ecuador.: Universidad Nacional de Chimborazo. 2013, p.116.

BAQUERIZO CABRERA, *et al.* Remoción de metales pesados en agua residuales utilizando las saponinas de la cabuya (*Furcraea andina*). En: Revista Espirales. Diciembre, 2017. vol. 1, no. 11, p.1–9.

BERMUDEZ ALVITE, Jaime D., TOUZA VASQUEZ, Manuel C. y SANZ INFANTE, Fernando. Manual de la madera de eucalipto blanco. Galicia, España: Fundación para o Fomento da Calidade Industrial e Desenvolvemento Tecnológico de Galicia, 2010. 143 p.

CABALLERO, Jorge. Diseño y construcción de un módulo para el sistema de recolección superficial de hidrocarburos para la piscina de carga BA-4001 de la planta de tratamiento de aguas residuales ptar de la gerencia complejo Barrancabermeja Ecopetrol S.A. Tesis para optar por el título de Diseñador Industrial. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander. 2008, p. 23.

CAMBIELLA, Angel, *et al.* Tratamiento de emulsiones de aceite en agua: rendimiento de un filtro de lecho de aserrín. En: Diario de materiales peligrosos. 17 de abril del 2006. Vol 131(1–3), p.195–199.

CHOW, Susana. Petroquímica y sociedad. 2 Ed. México D.F.: Fondo de cultura económica, 1997. p.129. ISBN 978-607-16-2141-2(ePub).

CORREDOR, Karla. Evaluación del rendimiento de adsorción de materiales como el aserrín, cascarilla de arroz y estropajo natural, en diferentes tamaños de grano, para la contingencia de derrames de hidrocarburos en ambientes acuáticos. Tesis para optar por el título de Ingeniero Químico. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander. 2017. p.49.

DANGLAD, José, et al. Partículas hidrofobadas de bagazo de caña de azúcar para el tratamiento de hidrocarburos en agua. En: Saber: revista científica del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente. Marzo de 2013, vol. 25. no1, p.99.

ECOPETROL S.A. Reporte integrado de gestión sostenible. Bogotá, Colombia.: SUÁREZ GÓMEZ, Ariel. et al, 2017. 398 p.

El Semillero. Moncoro. Adaptación, usos, madera, vivero, rendimientos y silvicultura de 95 especies [en línea], n.d [revisado 13 enero 2019]. Disponible en Internet: <http://elsemillero.net/nuevo/semillas/moncoro.html>.

FRANCO BURGOS, Amarilis (n.d.). Secado de madera. Retrieved from [http://webdelprofesor.ula.ve/forestal/are/materias/Industrias_Forestales/Gu%EDas-de-estudio_IND/Secado/gu%EDa de secado.pdf](http://webdelprofesor.ula.ve/forestal/are/materias/Industrias_Forestales/Gu%EDas-de-estudio_IND/Secado/gu%EDa%20de%20secado.pdf).

GANESH KUMAR, A. et al. Biodegradation of complex hydrocarbons in spent engine oil by novel bacterial consortium isolated from deep sea sediment. En: Bioresource Technology. Octubre, 2014, vol. 170, p. 557.

GARCÍA NAVARRO, David Augusto y VIVAS VARGAS, Paula Andrea. Ampliación de la capacidad del sistema de tratamiento de agua de producción mediante el dimensionamiento conceptual de nuevos equipos en la estación jaguar ubicada en el bloque caracara. Tesis de grado para optar por el título de Ingeniero de Petróleos. Bogotá, Colombia.: Fundación Universidad de América. 2016. p. 49.

HERNÁNDEZ, Raúl; RODAS, Carlos; OSPINA, Carlos; URREGO, John; GODOY, José y ARISTIZÁBAL, Fabio. El Eucalipto. En: Cenicafé. Abril, 2006. vol. 1, no. 1, ISBN: 958 97441-7-6.

JACOBS, Maxwell Ralph. El eucalipto en la repoblación forestal. ORGANIZACION DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACION, Roma, Italia. 1981. No. 11. 723 p.

JAIMES, Diana y PICO, María. Diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales y de producción evaluando las diferentes alternativas nacionales y extranjeras- aplicación Campo Colorado. Tesis para optar por el título de Ingeniero de Petróleos. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander. 2009. p. 21- 22.

JIMÉNEZ VILLADIEGO, María Elvira y PADILLA GONZÁLEZ, Gustavo Adolfo. Evaluación del potencial de adsorción del aserrín para remover aceites pesados en cuerpos de agua a escala laboratorio. Tesis para optar por el título de Ingeniero Químico. Cartagena de Indias, Colombia. Universidad de Cartagena. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Química. 2012. 109 p.

JOAPETROL. Filtración de fluidos. [en línea], 9 de marzo de 2015 [revisado 27 de enero de 2019]. Disponible en internet: <http://joapetrol.com/services/filtracion-de-fluidos/>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia. El fique, agronomía y transformación. En: Guía ambiental del subsector fiquero. Enero, 2006. vol. 2, p. 25.

MINISTERIO PARA LA TRANSFORMACIÓN ECOLÓGICA. Impacto ambiental de los hidrocarburos y recuperación de los ecosistemas. [En línea] MITECO, Madrid, España. nd. [revisado 13 enero 2019]. Disponible en internet:

https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-medio-marino/plan-ribera/contaminacion-marina-accidental/impacto_ambiental.aspx.

MORALES RUBIANO, María Eugenia y PELAEZ PARADA, Nancy Stella. El estudio de la cadena productiva del fique. En: INNOVAR, revista de ciencias administrativas y sociales. Julio-diciembre, 2002. no. 20, p. 121-134.

MUÑOZ VELEZ, Mario Fernando, HIDALGO, Miguel Angel y MINA Hernández, Jose Hermisul. Fibras de fique una alternativa para el reforzamiento de plásticos. Influencia de la modificación superficial. En: Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustria. Julio-diciembre, 2014. vol. 12, no. 2, p 60-70.

NAVACERRADA, María, DÍAZ, Cesar y FERNÁNDEZ, Patricia. Characterization of a Material Based on Short Natural Fique Fibers. En: Bioresources. Mayo, 2014. vol. 9, no. 2, p.3480-3496.

OJEDA JARAMILLO, José R. Remoción de color en aguas residuales industriales por biosorción con residuos agrícolas e industriales. Tesis para optar por el título de Ingeniero en Saneamiento Ambiental. Santa Clara, Cuba.: Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. 2011. p. 72.

ORTEGA BUENO, Alberto y SACRISTAN CID, Javier. Diseño y construcción de una columna de adsorción con sepiolita. Diseño y construcción de una columna de adsorción con atapulgita. Tesis para optar por el título de Ingeniero Técnico en Electricidad. Madrid, España. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química. 2008. 123 p.

ORTIZ RIVERA, Arturo; RAMÍREZ ZAMORA, Rosa María y DURÁN MORENO, Alfonso. Pruebas RSSCT con mini-columnas de carbón activado para remover

materia orgánica natural (MON) presentes en aguas. En: Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 2002.

OVALLE, Sergio; BLANCO, Cristian y COMBARIZA, Marianny. Síntesis in situ de nanopartículas de plata sobre fibras de fique. En: Revista Colombiana de Química. Abril, 2013. vol. 42, no. 1, p. 30-31.

PERÉZ, Julián y Gardey, Ana. Definición de agua. Definición.DE [en línea], 2010 [revisado 20 de octubre de 2018]. Disponible en internet: <https://definicion.de/agua/>.

PORTAFOLIO. Sector petrolero usa 0,35 % del agua que se consume. En: El Tiempo. Bogotá D.C. 24 de junio del 2014. Sec. Economía y Negocios.

PRIETO DÍAZ, Vicente I. Y MARTINEZ DE VILLA PEREZ, Agustín. La contaminación de las aguas por hidrocarburos: un enfoque para abordar su estudio. Instituto nacional de higiene, epidemiología y microbiología. En: Revista Cubana Hig Epidemiol. 1999. Vol.37. Nº 1. p. 13.

RINCONES, Félix; MARFISI, Shirley; DANGLAD, Ángel y SALAZAR, Victoria. Adsorción de hidrocarburos de petróleo en agua mediante una columna empacada de bagazo de caña de azúcar. En: Saber: revista científica del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente. Septiembre del 2015. Vol 27. Nº 3. p.14.

RODRIGUEZ CALVO, Alfonso. Bioremediación de aguas contaminadas con hidrocarburos mediante sistemas bio-absorbentes. Trabajo de grado doctor en Ingeniería Química. Granada: Universidad de Granada. Instituto de Investigación del Agua. 2017. p.12.

SCHELLBACH, Sara, MONTEIRO, Sergio y DRELICH, Jaroslaw. A novel method for contact angle measurements on natural fibers. En: Materials Letters. ELSEVIER. Febrero, 2016. vol.164, p. 599-604. ISSN: 0167-577X.

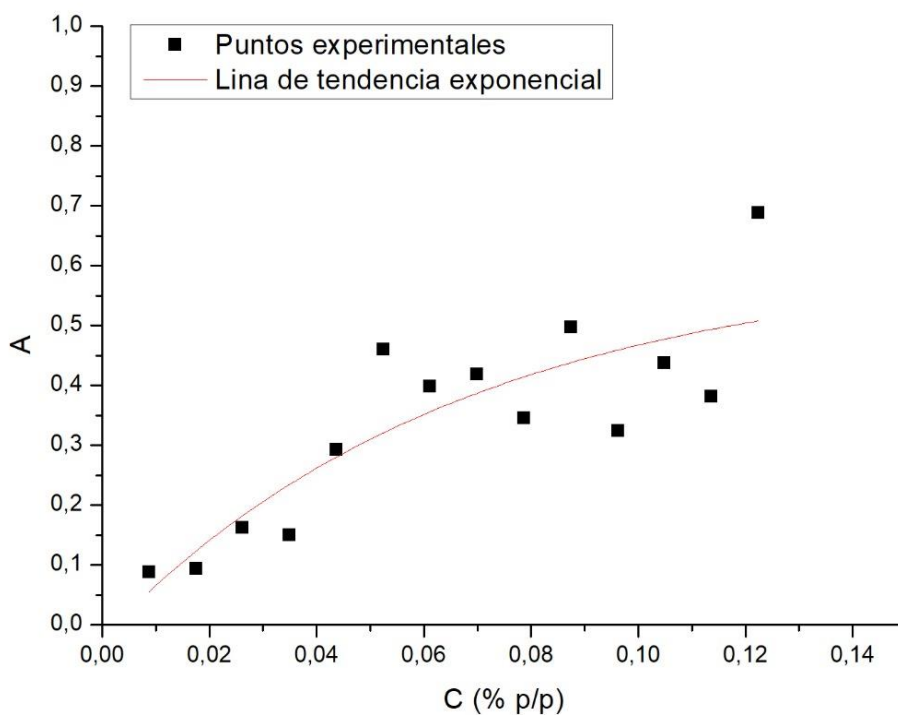
SERRANO MARTINEZ, José. Instrumentación y métodos de análisis químico. Curso. Universidad Politecnica de Cartagena. Cartagena. España. nd. p. 12.

SPENA GROUP. Tratamiento de aguas residuales en la industria del petróleo. [En línea], SPENAGROUP, Lima, Perú. nd. [revisado 1 febrero 2019]. Disponible en internet: <http://spenagroup.com/tratamiento-aguas-residuales-industria-petrolera/>

ANEXOS

ANEXO A. Demostración de la no linealidad para la curva de calibración con texapon.

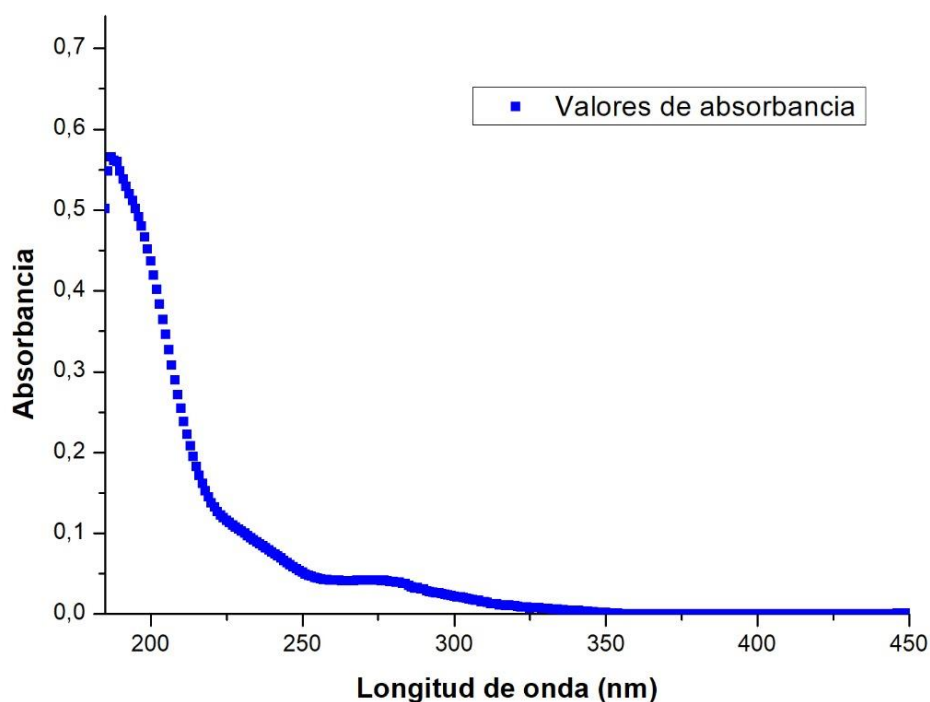
Figura 5: Curva de calibración usando surfactante



En esta figura se ogra apreciar la no linealidad de la curva de tendencia d acuerdo a los puntos obtenidos y su no paso por la coordenada $(0,0)$, lo que reafirma la decisión de no usar surfactante en esta investigación.

ANEXO B. Selección de la longitud de onda a trabajar.

Figura 6: Adsorbancia de agua destilada después de pasar por la columna



Esta figura permite visualizar la razón por la que no se pudieron analizar las muestras a longitudes de onda inferiores a 300, ya que se presenta interferencia de la materia orgánica que puede ser arrastrada desde la madera, por lo que se decide usar 339 nm como longitud de onda de referencia, al encontrar en esta longitud, un pico representativo de los aromático presentes en el diésel.