

CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE LA CASCARILLA DE ARROZ PARA REMOVER  
CROMO CONTENIDO EN AGUA CONTAMINADA A ESCALA LABORATORIO



GUSTAVO ANDRÉS MURCIA TEJEDOR



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
VILLAVICENCIO

2020

CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE LA CASCARILLA DE ARROZ PARA REMOVER  
CROMO CONTENIDO EN AGUA CONTAMINADA A ESCALA LABORATORIO

GUSTAVO ANDRÉS MURCIA TEJEDOR

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniera Ambiental

Asesor

VERÓNICA DUQUE PARDO

Ingeniera Ambiental, MSc. Hidrosistemas

Co-asesor

JAIR ESTEBAN BURGOS CONTENTO

Ingeniero Ambiental

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
VILLAVICENCIO

2020

**Autoridades Académicas**

**FRAY JOSÉ GABRIEL MESA ANGULO, O.P.**

Rector General

**FRAY EDUARDO GONZÁLEZ GIL, O.P.**

Vicerrector Académico General

**PADRE JOSÉ ANTONIO BALAGUERA CEPEDA, O.P.**

Rector Sede Villavicencio

**FRAY RODRIGO GARCÍA JARA, O.P.**

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

**JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN**

Secretaria de División Sede Villavicencio

**YÉSSICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN**

Decana Facultad de Ingeniería Ambiental

**Tabla de contenido**

	Pág
Resumen.....	8
Introducción .....	10
1. Planteamiento del problema.....	11
1.2. Descripción del problema.....	11
1.3. Formulación en torno al problema.....	12
2. Objetivos .....	13
2.1. Objetivo general .....	13
2.2. Objetivos específicos.....	13
3. Justificación.....	14
4. Alcance.....	17
5. Antecedentes .....	18
6. Marco de referencia.....	22
6.1. Marco teórico.....	22
6.2. Marco conceptual .....	24
6.3. Marco legal .....	25
7. Metodología .....	26
7.1. Identificación de las concentraciones de Cromo presentes en el agua superficial del río Ocoa.....	26
7.1.1. Revisión de referentes anteriores de estudios de monitoreo de Cromo (Cr) en el río Ocoa. ....	26
7.1.2. Preparación de Solución de Cromo .....	27
7.2. Determinación de las condiciones experimentales del tamaño de partícula y tiempo de retención que presenten mayor remoción de metales pesados (Cr) contenidos en agua superficial. ....	29
7.2.1. Preparación de la cascarilla de arroz.....	29
7.2.2. Activación química .....	30
7.2.3. Diseño experimental .....	31

7.3. Determinar la correlación existente entre el tamaño de partícula de la cascarilla de arroz, el tiempo de retención y la activación con peróxido de hidrógeno con los porcentajes de remoción de cromo presentados para la formulación de recomendaciones. ....	33
7.3.1. Análisis de remoción .....	33
7.3.2. Análisis estadístico. ....	33
7.3.3. Formulación de recomendaciones técnicas.....	34
8. Resultados y análisis de resultados .....	35
9. Conclusiones .....	44
10. Recomendaciones.....	45
Referencias bibliográficas .....	47

**Lista de tablas**

	Pág.
Tabla 1. Proyectos de investigación anteriores relacionados con la contaminación de cromo (Cr) en el río Ocoa. ....	26
Tabla 2. Aplicación del Tratamiento.....	31
Tabla 3. Significado del rango de correlación.....	33
Tabla 4. Tamaño de partícula 2000 $\mu\text{m}$ . ....	35
Tabla 5. Tratamiento tamaño de partícula 850 $\mu\text{m}$ . ....	37
Tabla 6. Tratamiento tamaño de partícula 600 $\mu\text{m}$ . ....	38
Tabla 7. Resultados tratamientos. ....	39
Tabla 8. Correlación de las variables de estudio con respecto al porcentaje de remoción. ....	41

**Lista de Figuras**

	Pág.
Figura 1. Dilución de la primera solución.....	28
Figura 2. Solución de Cromo .....	28
Figura 3. Muestra con solución de cromo para espectrofotómetro .....	29
Figura 4. Cascarilla en sus respectivos tamaños de partícula .....	30
Figura 5. Cascarilla secando en el horno.....	30
Figura 6. Biomasa en vaso, tiempo de retención y tratamiento a 250 rpm .....	32
Figura 7. Tratamiento tamaño de partícula 2000 $\mu\text{m}$ .....	36
Figura 8. Tratamiento tamaño de partícula 850 $\mu\text{m}$ .....	37
Figura 9. Tratamiento tamaño de partícula 600 $\mu\text{m}$ .....	38
Figura 10. Tratamientos de remoción .....	40

## Resumen

Los metales pesados en los últimos años han causado gran afectación a los cuerpos de agua y por ende a la salud pública, debido a que su presencia en el recurso hídrico genera características de toxicidad y causa afectaciones al ambiente. Para su remoción han sido necesarias técnicas costosas en su mayoría, lo que ha dado auge a la investigación relacionada con el tratamiento de estas aguas contaminadas por medio de una técnica conocida como biosorción.

El Cromo es uno de los metales pesados que presenta mayores problemáticas ambientales y de salud pública; este metal se encuentra con facilidad en el agua vertida por las actividades industriales que lo requieren dentro de sus procesos, principalmente las curtiembres, conservación de maderas y fabricación de aerosoles; generando impactos a la salud pública como efectos carcinógenos y mutagénicos.

En este proyecto se determinó la eficiencia de la cascarilla de arroz para remover concentración de Cromo correspondiente a 1.62 mg/L contenido en muestras de agua sintética. Para esto se evaluaron 3 tamaños de partícula por medio de tamices y 2 tiempos de retención, para determinar qué incidencia tienen respecto a la remoción del Cromo. Adicionalmente, se evaluó la remoción haciendo uso de la activación con peróxido de hidrogeno, con el fin de determinar si por medio de esta técnica se optimiza dicha remoción.

A partir de los resultados obtenidos en los tratamientos desarrollados, se afirma que la cascarilla de arroz es un material viable para el tratamiento de aguas contaminadas con cromo, al obtenerse valores de remoción correspondientes a un 93% bajo las condiciones técnicas de un tamaño de partícula de 600  $\mu\text{m}$ , tiempo de retención de 720 minutos, activación de la cascarilla antes del proceso de remoción con peróxido de hidrogeno y por último, una temperatura en el laboratorio de 20 °C.

**Palabras claves:** Biosorción, peróxido de hidrógeno, metales pesados

### Abstract

Heavy metals in recent years have caused great damage to water bodies and therefore to public health, due to the fact that their presence in the water resource generates characteristics of toxicity and causes damage to the environment, mostly expensive techniques have been necessary for its removal, which has given rise to research related to the treatment of these contaminated waters using a technique known as biosorption.

Chromium is one of the heavy metals that presents major environmental and public health problems; This metal is easily found in water poured by industrial activities that require it within its processes, such as tanneries, wood preservation and aerosols; generating impacts on public health such as carcinogenic and mutagenic effects.

In this project the efficiency of the rice husk to remove these concentrations of Chromium contained in water was determined. For this, 3 particle sizes were evaluated through sieves and 2 retention times to determine what incidence they have with respect to the removal of Chromium. Additionally, the removal was evaluated using activation with hydrogen peroxide, in order to determine if this removal is optimized through this technique.

From the results obtained in the treatments developed within this proposal, it is stated that the rice husk is a viable material for the treatment of waters contaminated with chromium since removal values corresponding to 93% were obtained under the technical conditions of a particle size of 600  $\mu\text{m}$ , retention time of 720 minutes, activation of the husk before the removal process with hydrogen peroxide and finally a temperature in the laboratory of 20 ° C.

**Key words:** Biosorption; hydrogen peroxide; heavy metals.

## Introducción

El presente proyecto tiene como objetivo, evaluar la capacidad de adsorción de la cascarilla de arroz a diferentes dimensiones para remover metales pesados (específicamente Cromo) contenidos en muestras de agua superficial del río Ocoa, así mismo identificar las concentraciones de Cromo, definir las condiciones experimentales del tamaño de partícula y tiempo de retención que presenten mayor remoción de cromo contenidos en agua superficial, posteriormente determinar la correlación existente entre el tamaño de partícula de la cascarilla de arroz, el tiempo de retención y la activación con peróxido de hidrógeno con los porcentajes de remoción de Cromo presentados.

Debido a los altos niveles de ecotoxicidad que presentan los metales pesados (Cormacarena, 2001), es necesario realizar la remoción de estos compuestos presentes en el agua superficial del río Ocoa, puesto que sus características causan afectaciones para la salud pública de la ciudad de Villavicencio. Este tratamiento, a su vez generaría un beneficio económico para las industrias arroceras presentes en la región, debido al aumento de la venta de la cascarilla, insumo que se utilizaría para la remoción de metales pesados como el Cromo, por ende mejoraría la calidad de vida de los ciudadanos, puesto que al disminuirse la concentración de estos metales se mejora y preserva el recurso hídrico y de manera indirecta el ecosistema, mejorando la salud pública en la ciudad de Villavicencio (Doria, Hormaza, & Gallego, 2010).

Villavicencio cuenta con 12 molinos de arroz, los cuales se encuentran activos en sus labores de producción causando esto la obtención de la cascarilla de arroz, material el cual es de suma importancia para dar inicio a esta investigación debido a que es el sustrato propuesto para implementar en los procesos de remoción.

## 1. Planteamiento del problema

### 1.2. Descripción del problema

Los cuerpos de agua superficial se han visto afectados por la contaminación por metales pesados, estos elementos químicos a concentraciones mínimas pueden causar efectos significativos a la salud pública alterando gravemente la calidad de vida de las personas (Barba, 2002); se pueden encontrar en los cuerpos de agua superficiales por la intervención antrópica sobre el medio ambiente y principalmente, por los desechos líquidos provenientes de los vertimientos de agua del sector industrial (agrícola y petrolero), del sector doméstico (Cormacarena, 2001) y de la escorrentía proveniente del sector urbano (Trujillo & Torres, 2015).

Asimismo, la afectación a los cuerpos hídricos se genera por servir en los ríos las aguas residuales sin tratamiento previo, estas aguas residuales provienen de actividades del sector industrial, minero y agrícola (Eduado & Triana, 2007), poseen mayor carga contaminante si no han sido tratadas en una planta de tratamiento de agua residual, lo cual evidentemente intensifica los impactos generados en el ambiente.

En Villavicencio, Meta no existe una planta de tratamiento de agua residual que cumpla con las necesidades de los desechos líquidos generados por el municipio, por lo que gran parte de la población realiza vertimiento directo al río Ocoa, convirtiéndose este en el cauce en el que se depositan las aguas residuales provenientes de la ciudad. Estos efectos del vertimiento se ve reflejado en las condiciones de calidad del efluente del mismo, las cuales no son nada satisfactorias (Cormacarena, 2001) sino por el contrario alarmantes, pues en estudios previos desarrollados en la Universidad Santo Tomas sede Villavicencio en los cuales se expresa como resultado presencia de cromo en el cuerpo hídrico obteniendo valores de concentración superiores a los máximos permisibles según la normatividad, siendo la concentración de 0.069 mg/L (Babativa & Caicedo, 2018), elemento que según la OMS es un metal tóxico (Buenfil, 2007; OMS, 2014) y puede no sólo generar afectaciones a la salud pública, sino también alteraciones a los ecosistemas que dependen directa o indirectamente de este río.

Por otro lado la cascarilla de arroz es proveniente del proceso para la obtención del arroz, esta cascarilla se toma como un subproducto y es utilizada como biocombustible o simplemente un desecho, sin embargo, se ha demostrado que la cascarilla de arroz tiene una gran capacidad de adsorción junto a otras propiedades químicas que permitirían su uso en procesos de remoción (Doria, Hormaza, & Gallego, 2010).

Sumado a esto, aún existe un vacío de conocimiento respecto al tratamiento de aguas contaminadas en la región, y los tratamientos que se conocen en su mayoría son costosos para algunas industrias que ejercen sus actividades en la cuenca del río Ocoa (Cormacarena, 2001), esto se refleja en que la mayor parte de los vertimientos reportados al cuerpo hídrico son ilegales (Mejía, 2014; Morales & Rojas, 2018), evidenciándose la carencia de métodos para el tratamiento de estos vertimientos antes de su llegada al río.

### 1.3. Formulación en torno al problema

¿Cuál es la eficiencia de la cascarilla de arroz para remover Cromo contenido en agua contaminada a escala laboratorio?

A partir de esta pregunta se plantearon las siguientes hipótesis:

- **Hipótesis:** la cascarilla de arroz con procesos de activación avanzado (Peróxido de hidrógeno) presenta mayor remoción de cromo VI contenido en agua contaminada respecto al tratamiento con cascarilla sin activar.
- **Hipótesis nula:** la cascarilla de arroz con procesos de activación avanzado (Peróxido de hidrógeno) no presenta un aumento en la remoción de cromo VI contenido en agua contaminada respecto al tratamiento de con cascarilla sin activar.

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo general**

Evaluar la capacidad de adsorción de la cascarilla de arroz a diferentes dimensiones de tamaño de partícula para remover cromo contenido en muestras de agua a escala laboratorio tomando como guía las reportadas en el agua superficial del río Ocoa.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Identificar las concentraciones reportadas de Cromo presentes en el agua superficial del río Ocoa.
- Definir las condiciones experimentales del tamaño de partícula y tiempo de retención que presenten mayor remoción de Cromo contenidos en agua superficial.
- Determinar la correlación existente entre el tamaño de partícula de la cascarilla de arroz, el tiempo de retención y la activación con peróxido de hidrógeno con los porcentajes de remoción de Cromo presentados.

### 3. Justificación

Debido a los altos niveles de ecotoxicidad que presentan los metales pesados, es necesario realizar la remoción de estos compuestos presentes en el agua superficial del río Ocoa ya que se conoce el estado actual de la calidad del cuerpo de agua donde se encuentra concentraciones de cromo, el cual un metal pesado que se puede encontrar de manera más específica en las actividades provenientes al curtido de cueros, colorantes, curtiembres, industrias que se dedican a la fabricación de preservantes para la madera y en las actividades del día a día de las personas puesto que este metal es utilizado para la fabricación de los suministros de agua potable que al pasar el tiempo estos se deterioran y aportan cromo al recurso hídrico sin ser esta su función ya que estas tuberías tienen como finalidad es el transporte de agua (Babativa & Caicedo, 2018), puesto que estos además de ser tóxicos para la salud pública también tienden a impactar de forma relevante los ecosistemas que abastece el cauce, así mismo, estos metales pesados al ser persistentes tienden a agruparse aumentando cada vez más la carga contaminante presente en el agua (Cormacarena, 2001). Asimismo, se han reportado concentraciones de cromo de 0.069 mg/L (Babativa & Caicedo, 2018) en el cauce como también investigación aportan en sus conclusiones que el cromo no solo llega al río directamente por los vertimientos que se realizan en el río sino también por la escorrentía de la ciudad donde tanto en el aire como en el suelo se encuentra también la presencia de cromo y este termina en el cuerpo de agua superficial (Trujillo & Torres, 2015).

La necesidad de remoción de metales pesados contenidos en agua, se ha evidenciado desde que se conocen los daños perjudiciales que estos ocasionan tanto al ambiente como a las personas, sin embargo, el desarrollo de tecnologías ha dado como resultado bajos niveles de remoción, generación de lodos tóxicos, altos gastos energéticos y económicos (Doria, Hormaza, & Gallego, 2010).

Por este motivo es necesario generar nuevas alternativas para este proceso, que cumpla con los requerimientos económicos y de remoción que presentan algunas industrias de Villavicencio; en el municipio se encuentra gran parte de industria agrícola y específicamente industria de arroz, por lo que tiene un alto potencial para hacer uso de los productos secundarios o residuos generados de estas actividades.

En los últimos años se ha podido evidenciar cómo ha aumentado la demanda de tratamientos para la purificación del agua que se encuentra contaminada por residuos industriales debido a su alto contenido de metales pesados. Es por esto que los países en vía de desarrollo optan por la implementación de técnicas utilizadas por los países desarrollados, utilizando reactivos químicos como el reactivo Fenton, esta técnica consiste principalmente en la oxidación química para disminuir la carga contaminante del agua, puesto que no solo se cambia la fase del contaminante sino también se transforma químicamente, esto permite la destrucción completa del contaminante objetivo que en la mayoría de técnicas convencionales está sujeto a tratamientos complementarios; sumado a esto, la activación con peróxido de hidrógeno permite mejorar las características organolépticas del agua y su vez disminuye la necesidad del cloro como agente desinfectante en los procesos de tratamiento (Domènech, Jardim, & Litter, 2014).

En Colombia los residuos provenientes del cultivo de arroz están estimados en un valor aproximado a las 6.3 millones de toneladas por año, debido a que no se realiza una adecuada disposición de este material se generan problemas ambientales por medio de la cascarilla y el polvo de la misma; Aunque no es desconocimiento parte de estos "desechos" se comercializan y son incorporados nuevamente en un ciclo de producción bien sea para jardinería y avicultura también se les da un uso en establos y caballerizas, no obstante, estas actividades no consumen más del 5% de la cascarilla de arroz producida. El uso que mayor demanda tiene en cuanto requerimiento de cascarilla es en el cual se utiliza como sustrato para el cultivo de flores, pero aun así esto no es suficiente demanda respecto a la oferta en la que se encuentra la cascarilla, además se calcula que en departamentos como el Huila, Casanare, Tolima y Meta se producen alrededor de 580.000 toneladas por año de cascarilla de arroz. (Piñeros, 2014).

La cascarilla de arroz tiene ciertas propiedades de las cuales se destaca su adsorción para ser utilizadas como un biosorbente, que con ayuda de procesos químicos como lo es la activación con peróxido de hidrogeno, se optimiza su capacidad de remoción, proceso que es de suma relevancia en el campo ambiental puesto que se estaría utilizando un residuo proveniente de los cultivos de arroz (Gallego, 2016; Doria, Hormaza, & Gallego, 2010), este material a su vez se estaría adaptando como un tratamiento de cuerpos de agua superficial receptores de vertimientos industriales que contienen metales pesados, por lo tanto este tratamiento también puede ser utilizado directamente en las aguas residuales industriales. (Doria, Hormaza, & Gallego, 2010)

Referentes para la afirmación

En caso de presentar altos niveles de remoción, el tratamiento de aguas residuales industriales podría percibirse como un nuevo mercado para la venta de la cascarilla de arroz en la región de Villavicencio. Adicionalmente se podría evidenciar a largo plazo una mejora de calidad de vida de los ciudadanos debido a la disminución de la concentración de estos metales pesados en los cuerpos de agua superficial (OMS, 2014) como también el uso potencial de la cascarilla podría disminuir la oferta actual en el que se encuentra dicho residuo, sin embargo, los resultados que se tienen de estas propuestas son netamente a escala laboratorio con resultados de remoción de metales pesados como el plomo, cadmio, manganeso y cromo superiores al 90% (Vera, 2015; García, Campos, Cruz, Calderón, & Buitrón, 2016 ).

#### 4. Alcance

El proyecto se llevó a cabo en las instalaciones del laboratorio de aguas del campus Aguas Claras, Universidad Santo Tomás, sede Villavicencio, tuvo una duración de 4 meses en los que se contempló realizar durante el primer mes la preparación de una solución base, el segundo y tercer mes se destinaron a la aplicación de los tratamientos y el último mes a la lectura y obtención de resultados para la formulación de recomendaciones.

En lo que respecta a la zona de estudio, se tomó como referente para la fabricación de las muestras sintéticas el río Ocoa debido a que contiene cromo, se encuentra en el departamento del Meta (parte norte del departamento) y comprende su jurisdicción en el municipio de Villavicencio, se escoge este cuerpo de agua por los resultados que se reportan por parte de investigaciones realizadas allí donde por medio de estudios se determina que el recurso hídrico contiene concentraciones de metales pesados superiores a las máximas permisibles según la normatividad ambiental causando esto afectaciones tanto al ambiente como a la salud pública ya que algunas personas dependen de este cuerpo de agua para sus actividades domésticas en el día a día como también actividades agrícolas y piscícolas; Además, que en este efluente se realizan 14 vertimientos reportados de manera ilegal por la autoridad ambiental competente conocida como Cormacarena.

La población a la cual se quiere llegar con este estudio es primeramente a las entidades y autoridades de carácter ambiental para el conocimiento de una propuesta en lo que respecta al tratamiento de aguas contaminadas con cromo, asimismo, se desea llegar a las industrias arroceras y agrícolas para dar conocimiento de que sus residuos poseen un alto potencial para el tratamiento de aguas que se encuentran con concentraciones de metales pesados y así darle otro uso a estos desechos generando un aporte significativo para el medio ambiente puesto que los cuerpos de agua son fundamentales para el progreso y la supervivencia, por último pero no menos importante se desea llegar a las comunidades aledañas al cauce como a todas aquellas cercanas a cuerpos de agua que cuentan con presencia de metales pesados pues no todas las personas tienen conocimiento de lo tóxicos y perjudiciales que pueden ser estos para nosotros.

## 5. Antecedentes

Los impactos ambientales causados por los metales y metaloides en los efluentes es un problema que no solo se da en contexto local sino también regional e incluso mundial (Martín, 2016), causando que se realicen investigaciones que respeten a la identificación de las concentraciones presentes de estos químicos en las aguas superficiales y subterráneas (Delgado-Rodríguez, 2012), debido a que estos cuerpos de agua abastecen tanto a personas como también a los ecosistemas en que estos se encuentran (Mejía, 2014).

En Villavicencio que es la zona en la que se desarrollará esta investigación y más específicamente en el río Ocoa, los estudios entorno al recurso hídrico son muy pocos, de los cuáles, en relevancia están los monitoreos hidrobiológicos y físico-químicos (Trujillo & Torres, 2015). Respecto a la remoción de los metales pesados en los cuerpos de agua superficiales como lo es el río Ocoa, son pocas las investigaciones que se han realizado y se direccionan en su mayoría en evaluar formas de tratamiento de agua por medio de planta de tratamiento de agua potable (PTAP) y planta de tratamiento de agua residual (PTAR), plantas que a su vez no se encuentran en el municipio de Villavicencio.

En varios estudios desarrollados en este cuerpo hídrico, se ha obtenido como resultado la presencia de concentraciones de metales y metaloides como el Níquel el cual se encuentra con concentración de  $85\mu\text{g/l}$  en el punto de vertimientos provenientes de industrias de fabricación de materiales quirúrgicos y textiles, sumado a las aguas residuales provenientes de la ciudad que realizan esta actividad en el río Ocoa y se puede determinar que estos vertimientos están muy por encima de los niveles máximos permisibles de concentración o carga contaminante estipulados en la Resolución 631 del 2015, de estos estudios se resalta, la investigación generada por Trujillo y Torres (2015), la cual identificó la presencia y concentración de metales que pueden ser tóxicos como el Plomo en  $< 40791,8\mu\text{g/g}$  – Cromo en  $< 115, 3\mu\text{g/g}$  – y Níquel en  $< 123,3\mu\text{g/g}$ , estos metales presentes en la formación de sedimentos viales en la ciudad de Villavicencio los cuales pueden llegar al efluente por medio de la escorrentía generada en las precipitaciones que se den en la ciudad causando tanto afectación pública como ambiental (Trujillo & Torres, 2015), como también en un estudio que se realizó en el año 2018 se encuentra una concentración cromo con un valor de  $0,69\text{ mg/L}$ , se estima que por fenómenos ambientales como precipitación causando lluvia

ácida y escorrentía se aumente cada vez más la concentración de los metales pesados presentes en el agua junto con las causas directas como lo son los vertimientos en dicho efluente. (Babativa & Caicedo, 2018)

Dicho esto se puede afirmar que los impactos ambientales generados por metales pesados se presentan no solo a nivel regional sino mundial puesto que no existe lugar que no genere las actividades que ocasionan estos metales pesados, así mismo, los estudios que se conocen en este campo dan relevancia a que los metales pesados afectan todo lo que les rodee de ambiente y que la falta de técnicas de remoción de los mismos genera una gran dependencia de las técnicas de remoción tradicional que son muy costosas (Morales & Rojas, 2018).

Debido a esta situación se han implementado diferentes estrategias de remoción de estos compuestos, siendo la biosorción una de estas técnicas, En el año 2000, en México se realizó un estudio de biosorción en el cual se buscaba la captación de los metales pesados por medio de una biomasa viva o muerta, en este caso se utilizó de forma viva plantas superiores y microorganismos para así lograr por medio de este método una alternativa de desintoxicación, sin embargo, afirmaron que al utilizar como sustrato materia orgánica viva inciden factores que podrían retener e incluso anular el proceso de biosorción, puesto que el metabolismo de la biomasa se vería directamente afectado por esto. (Cañizares, 2000).

En el año 2010 en la universidad nacional de Colombia se realizó un estudio titulado “Cascarilla de arroz: material alternativo y de bajo costo para el tratamiento de aguas contaminadas con Cromo (vi)” en el cual se propone el uso de la cascarilla de arroz para la remoción de Cromo VI contenido en agua contaminada de manera simulada de curtiembre a escala laboratorio, estudio en el cual se obtuvo como conclusión que la cascarilla de arroz para remover el metal pesado contenido en las muestras de agua es viable debido a que se logran resultados de remoción superiores al 90%, sin embargo la cascarilla de arroz en lo que respecta a las condiciones del tratamiento resultó ser altamente dependiente de las variables de valor pH, dosificación de adsorbente, concentración inicial del metal y tiempo de contacto (tiempo de retención que se propone como eficiente correspondiente a 720 minutos) (Doria, Hormaza, & Gallego, 2010).

En el año 2014 en Cartagena, Colombia, se realizó un estudio titulado “Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico” en este estudio se trabaja por el principio de la adsorción utilizando material biológico para este fin, en éste se destacan puntos clave de la investigación como la influencia con respecto a la adsorción del material biológico en

parámetros como el pH de la solución, el tamaño de la partícula del adsorbente, la temperatura y la concentración del contaminantes, son factores que inciden directamente en la eficiencia del proceso de esta técnica (Candelaria Tejada-Tovar, 2014).

En el año 2015 en Quito, Ecuador, se realizó una publicación de los resultados de un estudio de biosorción para metales pesados donde se utilizaban como biosorbentes materiales como el bagazo de la caña de azúcar, el mesocarpio (fibra) del coco y la mazorca de maíz como material biosorbente, utilizándolos para tratar aguas contaminadas a escala laboratorio con cadmio y plomo que fueron escogidos para el estudio debido al nivel de peligrosidad y toxicidad, donde los resultados de remoción fueron eficientes logrando remover con el bagazo de caña un 87,63% el Cadmio y de un 98,8 % el plomo, con el mesocarpio de coco se redujo el cadmio en un 88,32% y el plomo en un 99,8 %. Finalmente, con la mazorca de maíz se removió un 72,34% del Cadmio y 93,12% del plomo; Se destacaba este estudio porque la materia prima que se necesita para la remoción de estos metales pesados es fácil de conseguir y se da en gran cantidad e inclusive se daba solución o un problema por medio de la acumulación de un residuo potencial para el tratamiento de aguas contaminadas por metales pesados. (Vera, 2015).

En el año 2016 en la Universidad Santo Tomas sede Bogotá, se realizó un estudio titulado “comparación del potencial de eliminación de cromo (vi) contenido en aguas a nivel de laboratorio a través de las propiedades de residuos provenientes de una agroindustria por medio de la técnica de biosorción” del cual se toman como aportes importantes para la realización de este trabajo el manejar tres tamaños de partícula en lo que respecta a la biomasa que se utiliza para el tratamiento junto con la metodología implementada para el acondicionamiento respectivo de la misma, es decir, las condiciones de lavado y secado del material proveniente de la agroindustria como la adaptación de estos en el momento de realizar la activación química que en este caso se utiliza para ello el reactivo Fenton, además de parámetros metodológicos como las revoluciones por minuto que se manejaron (250rpm) con los equipos como también los tiempos de contacto en la activación y en el secado de la biomasa; este estudio fue de gran importancia en la metodología del presente trabajo y más adelante se verá en detalle.

En México se realizó un estudio titulado “Biosorción de Cd, Cr, Mn y Pb de soluciones acuosas industriales por cepas de *Bacillus sp.* aisladas de lodos activados” se identificaron bacterias tolerantes a dichos metales pesados tóxicos y presentes en aguas residuales provenientes de procesos industriales para así poder brindar una alternativa para el tratamiento de estas(industria

agrícola, textil, doméstica, etc.) cabe resaltar que la biomasa no viva que se utilizó en este estudio logró resultados eficientes de remoción (mayores del 90%) de los metales pesados tratados (García, Campos, Cruz, Calderón, & Buitrón, 2016).

En el año 2017 se realizó un estudio en Medellín-Colombia, se implementaron diferentes tratamientos de agua residual proveniente de la industria textil, en este estudio se alcanzaron porcentajes de remoción de DQO de un 54% por medio de procesos de tratamiento tradicionales de coagulación y floculación, sin embargo, al ser comparados con los resultados obtenidos a partir de la implementación de reactivo fenton se evidenció una optimización de remoción pues los resultados con esta tecnología fueron del 74%, aproximadamente un 20% superior a la tecnología tradicional implementada inicialmente (GilPavas, Dobrosz, & Gómez, 2017).

El peróxido de hidrógeno conocido químicamente como  $H_2O_2$  es un reactivo el cual permite la activación química de la superficie de algunos materiales, este al ser utilizado otorga a la biomasa en cuestión la particularidad de realizar mayor adsorción con respecto a remoción de metales pesados, existe un estudio titulado “Sorption of Pb (II) using hydrogen peroxide functionalized activated carbón” el cual comprueba como al utilizar el peróxido de hidrógeno a una concentración correspondiente del 10% y superior logra resultados de activación en el carbón para remover plomo presente en muestras. (Gan & Wu, 2008).

Para este proyecto se ha decidido proponer una alternativa de remoción por medio de adsorción, a partir de la cascarilla de arroz, un residuo que se da en gran cantidad en Villavicencio. Se determinó la eficiencia de este como biosorbente puesto que metales pesados como el cromo y arsénico están presentes en el río Ocoa (Morales & Rojas, 2018; Trujillo & Torres, 2015) y al no ser removidos generan problemáticas ambientales como deficiencia en el funcionamiento natural del ecosistema, la cascarilla fue seleccionada por su notable capacidad de adsorción la cual es atribuida por los componentes que la conforman en sí, componentes como celulosa, hemicelulosa, lignina y algunas proteínas las cuales le brindan la capacidad de poder causar remoción de metales pesados con un 94% de eficiencia en concentraciones de metales pesados presentes en agua en un 80%, dicho estudio expuesto en la revista de Gestión y Ambiente también propone que el tiempo en que se realiza la máxima remoción por parte de la cascarilla es en un lapso de tiempo de 720 minutos y que el pH de la solución juega un papel importante en la capacidad de adsorción por parte de la cascarilla de arroz. (Doria, Hormaza, & Gallego, 2010)

## 6. Marco de referencia

### 6.1. Marco teórico

La biosorción se define como una característica que poseen algunas biomoléculas para unir y así poder concentrar iones con otro tipo de elementos, esta se identifica porque se efectúa por medio de biomasa muerta y tiene como principio la afinidad de sorbato y biosorbente (Volesky, 2007); según estudios se ha podido evidenciar como las células microbianas poseen el potencial para captar iones provenientes de metales pesados y así poder brindar una opción económica relevante a los adsorbentes que se utilizan actualmente en el gremio de remoción puesto que además de traer beneficios de relevancia ambiental también trae consigo beneficios económicos ya que al utilizar células que están muertas se disminuye los costos de mantenimiento de las mismas, menos tiempo sacrificado en el mantenimiento y puede recuperarse fácilmente la materia prima que se necesita para el biosorbente (Das, Karthika, & Vimala, 2008). Este principio de biosorción está siendo aplicado en procesos de remoción de diferentes compuestos para la optimización de estos tratamientos se han desarrollado diferentes metodologías relacionadas con los procesos de oxidación avanzada.

Los Procesos avanzados de oxidación pueden ser utilizados para tratar aguas residuales las cuales necesiten procesos de desinfección, remediación y destoxificación de aguas especiales; Estos procesos al emplearse pueden causar cambios en la estructura química del contaminante y así facilitar la reducción o remoción de estos en el agua. (Domènech, Jardim, & Litter, 2014) . Uno de los procesos avanzados más utilizados debido a su economía y su facilidad de aplicación es la aplicación de reactivo fenton.

El Reactivo Fenton es utilizado para activar una superficie, este reactivo al ser aplicado en una superficie se adhiere a esta y así lograr procesos de oxidación, dichos procesos lo que hacen en reducir los elementos que tengan contacto con la superficie particularmente metales pesados, al hacerse esto se puede disminuir la concentración de un contaminante en partículas o cambiar su estado de oxidación del más tóxico al menos perjudicial para la salud (Gallego, 2016). Una de las metodologías para realizar la medición de material contaminante contenido en agua es la espectroscopia de reflectancia difusa.

La espectroscopia de reflectancia difusa (DRIFT) es un método analítico que permite por medio de espectros infrarrojos, medir las concentraciones de compuestos y así analizar la muestra que se trata, estos resultados obtenidos se pueden expresar en forma de gráfica la cual relaciona los picos de la gráfica con la estructura molecular de la muestra, así mismo, para desarrollar esta técnica los rayos infrarrojos emiten una energía que al penetrar la muestra interactúan estos rayos con las partículas de la misma reflejándolos en distintas direcciones causando lo que se conoce como reflectancia difusa. Esta técnica se basa en mezclar Bromuro de Potasio (este tiene que estar en polvo) con la muestra y así ocasionar esta mezcla la respuesta de la celda DRIFT la cual genera el reflejo de la radiación y recopila la energía reflejada. (Gallego, 2016; Stuart, 2004; Smith, 2011).

Espectrofotometría UV/VIS es una técnica analítica la cual permite identificar la concentración de un compuesto determinado en una solución, su principio consiste en que las moléculas absorben las radiaciones electromagnéticas y a su vez que la cantidad de luz absorbida se relaciona de forma lineal con la concentración, esta técnica es utilizada con principios de colorimetría (Diaz, y otros, 2008).

Espectrofotómetro Spectroquant Prove 600 UV/VIS es un potente espectrofotómetro el cual permite por medio de su diseño el análisis de agua, este equipo ofrece sistemas ópticos de gran resolución junto con una facilidad en el manejo del mismo cuando se analizan las muestras que se requieren, tanto así que nos permite el identificar fácilmente la concentración que deseemos saber de las muestras de agua y para este proyecto es importante pues entre ellas está la de Cromo VI.

Cromatos Mquant: este test es un método colorimétrico para hallar cromo en agua, consta del uso de 2 reactivos los cuales en este test se conocen como Cr-1 y Cr-2, el primer reactivo es básicamente el polvo y se adiciona por medio de microcucharas, en este test se toma una de estas a ras y se adiciona en un tubo de ensayo previamente seco para continuar con el reactivo dos el cual viene de manera líquida y su forma de adiciones al test es por medio de goteo, es decir, se agregan 6 gotas de este reactivo en el mismo tubo de ensayo con el reactivo 1, después de esto se procede a agitar el tubo de ensayo hasta obtener una mezcla homogénea para dar paso a la adición de 5 ml de la muestra a evaluar, cuando ya se tiene todo esto en el tubo de ensayo se vuelve este a agitar por 60 segundos y se procede a traspasarlo a una celda de cuarzo la cual se lleva al espectrofotómetro en cuestión y este por medio de la espectrofotometría uv/vis determina la concentración de cromo allí en mg/L (SUPELCO, 2018).

El peróxido de hidrógeno es un reactivo químico el cual permite por medio de su estructura  $H_2O_2$  generar radicales HO los cuales causan la oxidación de materiales químicos presentes, en este trabajo estos materiales químicos son los metales pesados más exactamente el Cromo VI, metal el cual es altamente tóxico y contaminante; asimismo, el peróxido de hidrógeno es un reactivo el cual por sus características de agente oxidante es utilizado para los procesos de oxidación química por medio de su capacidad como agente para reducir contaminantes, mineralizarlos y su capacidad para adherirse en superficies brindando tratamiento a aguas contaminadas (Domènech, Jardim, & Litter, 2014).

## 6.2. Marco conceptual

Se identifican como metales pesados a todos los elementos que cumplen con las características de poseer un número atómico superior a 20 y a su vez tener una densidad de  $5g/cm^3$  o superior (Yagnentkovsky, 2011) estos metales pesados se pueden encontrar a diferentes concentraciones en los cuerpos de agua por actividades antrópicas o de forma natural por medio de la metabolización de los ciclos biogeoquímicos (Chata, 2015; Cordero, 2015) causando impactos en el ambiente por los niveles de toxicidad que estos poseen.

Los metales pesados son caracterizados por su toxicidad debido a los efectos nocivos e impactos que generan a los seres vivos y sus ecosistemas (Lozano, 2010), la toxicidad de estos se ve influida por biodisponibilidad, persistencia y bioacumulación características propias de contaminantes de difícil remoción (Coto, 2013; Rubio, 2015).

El Cromo (Cr) es conocido como un metal pesado, este elemento es muy utilizado en lo que respecta a industrias (curtiembres generalmente), además es muy común encontrarlo presente en los combustibles fósiles ocasionando que su presencia en el ambiente se deba a la combustión de los mismos; generando impactos a la salud pública como efectos carcinógenos y mutagénicos (Lozano, 2010). Las distintas concentraciones de este en el ambiente se deben a las actividades antrópicas realizadas por el campo industrial por medio de emisiones, vertimientos a cuerpos de agua y la anteriormente mencionada la combustión de los combustibles fósiles (Sarmiento Viteri, 2013). Además, la calidad del agua respecto a la presencia de cromo en los cuerpos de agua tiene como máximo límite permisible para consumo una concentración en cromo de 0,05 mg/l según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006).

Para la remoción de metales pesados se han implementado diferentes técnicas de remediación, dentro de estas técnicas cabe resaltar la biosorción a partir de residuos orgánicos, los residuos orgánicos provenientes de frutas y verduras, son aquellos residuos que se encuentran con mayor facilidad y en gran cantidad en los desechos de las personas puesto que son generados por realizar tareas del día a día, estos residuos son utilizados principalmente como materia prima para la fabricación de abono y fertilizante pero este uso no es muy confortable debido a que según estudios es muy probable que estos desechos tengan una gran capacidad de eficiencia en lo que respecta al tratamiento de aguas residuales lo cual se debe a que los desechos son ricos en nutrientes, vitaminas y elementos que generan una mayor afinidad con los metales pesados y así poder removerlos de las aguas contaminadas (Gallego, 2016).

### **6.3. Marco legal**

- Decreto 1542 de 1978, el cual prohíbe verter sin tratamiento residuos sólidos o aguas contaminadas que puedan afectar los cuerpos de agua y causar afectaciones a la salud pública de las comunidades aledañas al recurso como a las que se abastecen del mismo.
- Decreto 475 de 1998, se establecen los criterios para elementos y compuestos químicos como también para la calidad del agua segura donde al superar los límites máximos permisibles se generan afectaciones las cuales son perjudiciales para la salud y el ambiente.
- Resolución 631 de 2015 por la cual se establecen los límites máximos permisibles en cuanto a los parámetros a evaluar presentes en el agua por medio de los vertimientos, puede ser para aguas superficiales o sistemas de alcantarillado público, asimismo, se determinan otras disposiciones en ella.

## 7. Metodología

### 7.1. Identificación de las concentraciones de Cromo presentes en el agua superficial del río Ocoa.

#### 7.1.1. Revisión de referentes anteriores de estudios de monitoreo de Cromo (Cr) en el río Ocoa.

Se realizó una revisión de diferentes estudios desarrollados en el río Ocoa, en los que se reportaron concentraciones de Cromo en el agua superficial. Para la elaboración de una muestra sintética se tuvo en cuenta la concentración más alta reportada, debido a que al ser una propuesta para tratamiento de vertimientos las concentraciones no estarían diluidas, por lo que contendrían mayores niveles de este metal.

Tabla 1.

*Proyectos de investigación anteriores relacionados con la contaminación de cromo (Cr) en el río Ocoa.*

Titulo	Concentración de Cromo obtenida(mg/L)	Autor - Año	Metodología analítica utilizada
Evaluación de la presencia y distribución de los metales pesados cromo, níquel y plomo en el río Ocoa, en la zona comprendida entre la desembocadura del caño Maizaro hasta el puente Murujuy, municipio de Villavicencio - Meta	0,069	Ivon Alejandra Babativa Juan Carlos Caicedo Molina 2018	Espectrofotometría

Continuación Tabla 1.

Titulo	Concentración de Cromo obtenida(mg/L)	Autor - Año	Metodología analítica utilizada
Identificación y comparación de presencia de metales pesados: Pb, Cr y Zn en el río Ocoa y sus fuentes de origen antrópico, Villavicencio – Meta.	0,81	Yuri Fernanda Patiño Acosta y Axel Camilo Sánchez 2019 - 2	Espectrofotometría

Nota: Investigación relacionados con la contaminación de cromo (Cr).

Al encontrar una concentración correspondiente a un valor de 0,81 mg/L se decide tomar esta concentración y doblarla en este aspecto para la realización de la muestra sintética en escala laboratorio, donde se obtuvo una solución madre con una concentración correspondiente a 1,62 mg/L; esta concentración fue la utilizada para que diera disposición al inicio de los tratamientos de remoción estipulados en esta metodología.

### 7.1.2. Preparación de Solución de Cromo

Se preparó la solución teniendo en cuenta la concentración propuesta anteriormente, para ello se utilizó dicromato de potasio (0.1gr) el cual sirvió para la preparación de la solución madre en agua destilada (100ml), al realizar la solución se procedió por medio del Test de cromatos Mquant y el espectrofotómetro a determinar la concentración de Cromo VI presente, dato el cual no se pudo determinar en este momento porque se encontraba muy concentrado el reactivo lo que conllevó a una dilución de la solución en la cual de los 100 ml que se tenían se tomó 1.5 ml y se diluyeron en 500 ml de agua destilada en un balón aforado, seguido de esto se procedió nuevamente a dar lectura de la concentración de Cromo VI presente en la solución donde el espectrofotómetro proporcionó un valor correspondiente a 3mg/L de Cromo VI presente en la muestra, nuevamente se realizó una dilución la cual constaba de tomar 1,5 ml de los 500 ml que se obtuvo anteriormente y precedió a

diluirlos nuevamente en 500 ml de agua para así disminuir la concentración de Cromo VI donde se encontró como resultado final de la muestra 1.62 mg/L (Ver Figura 1).



*Figura 1.* Dilución de la primera solución por Gustavo Murcia, 2020.



*Figura 2.* Solución de Cromo por Gustavo Murcia, 2020.

Se optó por dejar esta concentración con el fin de que el tratamiento pueda ir encaminado no solo a las aguas superficiales sino también a las aguas residuales provenientes de las industrias debido a que estos vertimientos se realizan con una concentración de cromo superior al valor que se encuentra en el agua superficial, lo cual se estimó que al verter el agua residual en el cuerpo de agua la concentración de cromo se diluye (La estimación se tomó a una reducción de la mitad en contenido de concentración de cromo en el agua)



*Figura 3.* Muestra con solución de cromo para espectrofotómetro por Gustavo Murcia, 2020.

En la Figura 3 se puede evidenciar la tonalidad violeta en esta muestra luego de aplicar el test de cromatos mquant, que es utilizado para la medición de Cromo VI en el espectrofotómetro. Para la preparación de esta muestra se debe tomar 5ml de la solución con cromo y luego agregar una microcucharada gris rasa del reactivo Cr-1, seguido de esto se adicionan 6 gotas del reactivo Cr-2, se hace homogénea la solución y transcurrido un minuto (tiempo de reacción) se procede a introducir la muestra en la cubeta de medición. El test de cromatos mquant tiene una sensibilidad entre 0,003 y 0,01 mg/L de cromo.

## **7.2. Determinación de las condiciones experimentales del tamaño de partícula y tiempo de retención que presenten mayor remoción de metales pesados (Cr) contenidos en agua superficial.**

### **7.2.1. Preparación de la cascarilla de arroz**

Luego de obtener la cascarilla de arroz se realizó un lavado de la misma con agua destilada, posteriormente se secó el biosorbente en el horno de secado a una temperatura de 80°C por 2 días (Gallego, 2016), transcurrido este tiempo de secado se procede a la separación del material en 6 réplicas de proporciones iguales, obteniendo 2 réplicas de cada tamaño de partícula (2000 $\mu$ m

tamaño original de la cascarilla sin macerar, 850 $\mu$ m y 600 $\mu$ m (Gallego, 2016)), Figura 5 esta clasificación se realizó a partir de tamices que permiten separar los diferentes tamaños de partícula.



*Figura 4.* Cascarilla en sus respectivos tamaños de partícula por Gustavo Murcia, 2020.

### **7.2.2. Activación química**

A una réplica de cada tamaño se realizó la activación química de la biomasa por medio del reactivo de peróxido de hidrógeno aplicándolo y mezclándolo con la biomasa seca y triturada, se filtró la mezcla y finalmente se procedió a secado en el horno a una temperatura de 60°C por una noche (Gallego, 2016). De esta manera se obtuvieron 2 réplicas de tamaños de partícula diferente con activación de peróxido de hidrógeno y 2 réplicas sin activación.



*Figura 5.* Cascarilla secando en el horno por Gustavo Murcia, 2020.

### 7.2.3. Diseño experimental

El diseño experimental constó de 12 tratamientos con variaciones en tamaño de partícula, tiempo de retención y activación con peróxido de hidrógeno. Durante la aplicación del tratamiento se agitó la muestra a 250 revoluciones por minuto (rpm) Figura 6 según lo propuesto por Gallego (Doria, Hormaza, & Gallego, 2010; Gallego, 2016) para garantizar el contacto directo de la muestra con todas las partículas del biosorbente. En la Tabla 2, se describen las variables aplicadas en cada tratamiento.

Tabla 2.

*Aplicación del Tratamiento.*

<b>Tratamiento</b>	<b>Tamaño de partícula (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Tiempo de retención (min)</b>	<b>Activación</b>
1	2000	720	Si
2	2000	180	Si
3	2000	720	No
4	2000	180	No
5	850	720	Si
6	850	180	Si
7	850	720	No
8	850	180	No
9	600	720	Si
10	600	180	Si
11	600	720	No
12	600	180	No

Nota: Variables aplicadas en cada tratamiento por Gustavo Murcia, 2020.

Para cada tamaño de partícula se definieron 2 tiempos de retención distintos según los reportados en la bibliografía: uno de 180 minutos y el otro de 720 minutos (Doria, Hormaza, & Gallego, 2010; Gallego, 2016), esto con el fin de poder determinar la influencia del tiempo de contacto en la remoción de cromo por parte de la cascarilla haciendo medición de la concentración de cromo remanente después del tratamiento por medio de espectroscopia.



*Figura 6.* Biomasa en vaso, tiempo de retención y tratamiento a 250 rpm por Gustavo Murcia, 2020.

Las 250 revoluciones por minuto(rpm) se mantuvieron en tiempos de retención correspondientes a 180 minutos y 720 minutos (Doria, Hormaza, & Gallego, 2010; Gallego, 2016), la cascarilla que se activó con peróxido de hidrógeno el cual se encontraba en una concentración del 15% para su proceso de activación. La cascarilla estuvo en contacto por 60 minutos con este reactivo también a 250 rpm, al cumplirse este tiempo se tomaba la cascarilla activada y se disponía a darle un secado en el horno de secado por una noche para seguido de este proceso, se utilizara ya activada para los tratamientos respectivos (Gallego, 2016).

#### **7.2.4. Aplicación de los tratamientos.**

Para la aplicación de los tratamientos se dispuso de 50 g de cascarilla de arroz en un vaso de precipitado, esta cascarilla ya habrá pasado por los procesos de lavado, secado y triturado-tamizado; después se adicionaron 500 ml de agua contaminada con cromo de concentración correspondiente a 1,62 mg/L que se obtuvo de la realización de la actividad 7.1.2. La mezcla se agitó a 250 rpm durante los tiempos de retención estipulados para cada tratamiento. Cumplido el tiempo de retención se dio paso a la filtración de la muestra para así poder medir la concentración final presente en el agua contaminada y determinar la cantidad de concentración adsorbida por la cascarilla, este proceso fue el mismo en todos los casos de tratamiento.

**7.3. Determinar la correlación existente entre el tamaño de partícula de la cascarilla de arroz, el tiempo de retención y la activación con peróxido de hidrógeno con los porcentajes de remoción de cromo presentados para la formulación de recomendaciones.**

### 7.3.1. Análisis de remoción

Se dio lectura a los resultados de remoción de la cascarilla de arroz activada con peróxido de hidrógeno y se comparó la eficiencia con respecto a la remoción de la cascarilla sin activar, éstos valores se midieron por el espectrofotómetro implementando el test de cromo.

### 7.3.2. Análisis estadístico.

Por medio del Coeficiente de correlación de Pearson (método escogido porque permite relacionar linealmente variables con diferentes escalas de medición como es el caso de esta investigación) se hizo un análisis estadístico entre el tamaño de partícula de la cascarilla de arroz, el tiempo de retención y la activación con los porcentajes de remoción de cromo obtenidos.

Tabla 3.

*Significado del rango de correlación.*

Rango de correlación	Significado
$r = 1$	Correlación Perfecta
$0,8 < r < 1$	Correlación muy Alta
$0,6 < r < 0,8$	Correlación Alta
$0,4 < r < 0,6$	Correlación Moderada
$0,2 < r < 0,4$	Correlación Baja
$0 < r < 0,2$	Correlación Muy Baja
$r = 0$	Correlación Nula

Nota: Rango de correlación. (González, 2009).

### **7.3.3. Formulación de recomendaciones técnicas**

A partir de los resultados obtenidos se formularon recomendaciones basadas en el tamaño de partícula, el tiempo de retención y la necesidad de activación con peróxido de hidrogeno o no según el tratamiento que presentó mayor remoción, esto con el fin de dar un uso a la cascarilla de arroz y una solución a la contaminación por cromo en los cuerpos de agua.

## 8. Resultados y análisis de resultados

Los resultados obtenidos al realizar la metodología propuesta son los que se aprecian a continuación junto con las características como los tres tamaños de partículas diferentes, con tiempos de retención de 180 minutos y 720 minutos, y activación de la cascarilla por medio del peróxido de hidrógeno.

Al evaluar los tratamientos con esta combinación de parámetros (Tabla 2). En esta tabla se evidencia la remoción de cromo obtenida a través de cada proceso y las características metodológicas que se usaron en el debido tratamiento. En todos los procesos de tratamiento se utilizó la misma cantidad de cascarilla de arroz (50 gr).

Para calcular el porcentaje de remoción (%Remoción) en todos los tratamientos de esta investigación se empleó la siguiente ecuación:

$$\%Remoción = \frac{C_o - C_e}{C_o} \times 100\%$$

Donde  $C_o$  es la concentración inicial la cual en todos los tratamientos es de 1,62 mg/L y  $C_e$  es la concentración final de cada tratamiento.

Tabla 4.

*Tamaño de partícula 2000  $\mu$ m.*

Tratamiento	Tiempo de retención (min)	Activación	Concentración		Remoción mg/L	Remoción %
			inicial de Cr (VI) mg/l	Concentración final de Cr (VI) mg/l		
1	720	Si	1,62	1,35	0,27	16,6
2	180	Si	1,62	1,44	0,18	11,11
3	720	No	1,62	1,45	0,17	10,49
4	180	No	1,62	1,53	0,09	5,55

Nota: Datos de tratamientos en diferentes tiempos de retención por Gustavo Murcia, 2020.

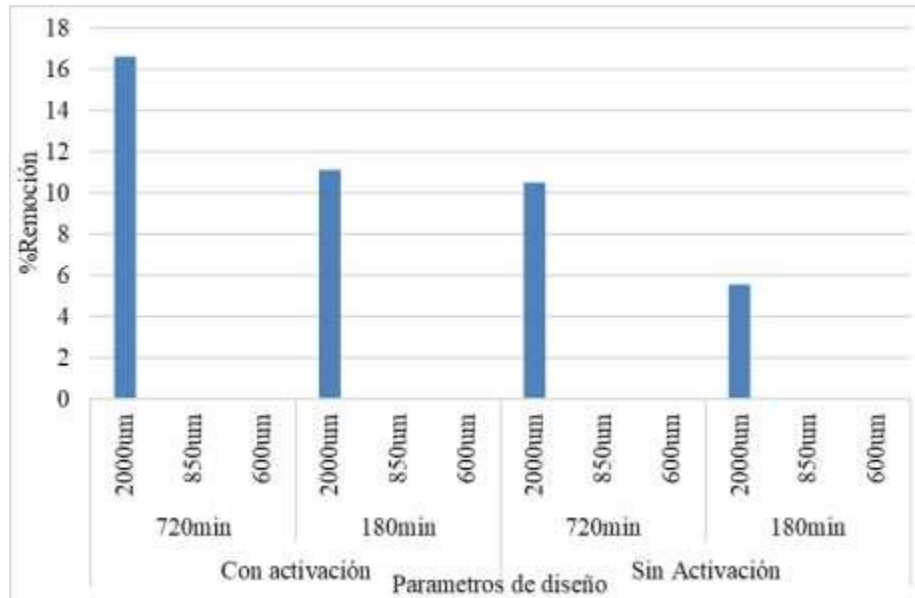


Figura 7. Tratamiento tamaño de partícula 2000 µm por Gustavo Murcia, 2020.

En la Figura 7 podemos evidenciar los resultados de remoción de los 4 tratamientos expuestos en los cuales vemos cómo el Tratamiento 1 es aquel que obtuvo un mayor porcentaje de remoción con un tiempo de retención más alto y a su vez con activación de la cascarilla de arroz.

La activación juega un papel importante pues vemos que el Tratamiento 2 con tiempo de retención de solo 180 minutos, que cuenta con activación de la cascarilla, y logra una remoción correspondiente al 11,11% mientras que los tratamientos 3 y 4 sin dicha activación alcanzan un porcentaje de remoción del 10,49% (720min) y 5,55% para un tiempo de retención de 180min, siendo la activación el parámetro que diferencia esta capacidad de remoción en ambos tiempos de retención puesto que todos estos tratamientos tienen en similitud el tamaño de partícula de la cascarilla.

Tabla 5.

*Tratamiento tamaño de partícula 850  $\mu\text{m}$ .*

Tratamiento	Tamaño de partícula	Tiempo de retención (min)	Activación	Concentración inicial de Cr (vi) mg/l	Concentración final de Cr (vi) mg/l	Remoción mg/L	Remoción %
5	850 $\mu\text{m}$	720	Si	1,62	1,01	0,61	37,65
6	850 $\mu\text{m}$	180	Si	1,62	1,13	0,49	30,24
7	850 $\mu\text{m}$	720	No	1,62	1,39	0,23	14,19
8	850 $\mu\text{m}$	180	No	1,62	1,47	0,15	9,25

Nota: Datos de tratamientos en diferentes tiempos de retención por Gustavo Murcia, 2020.

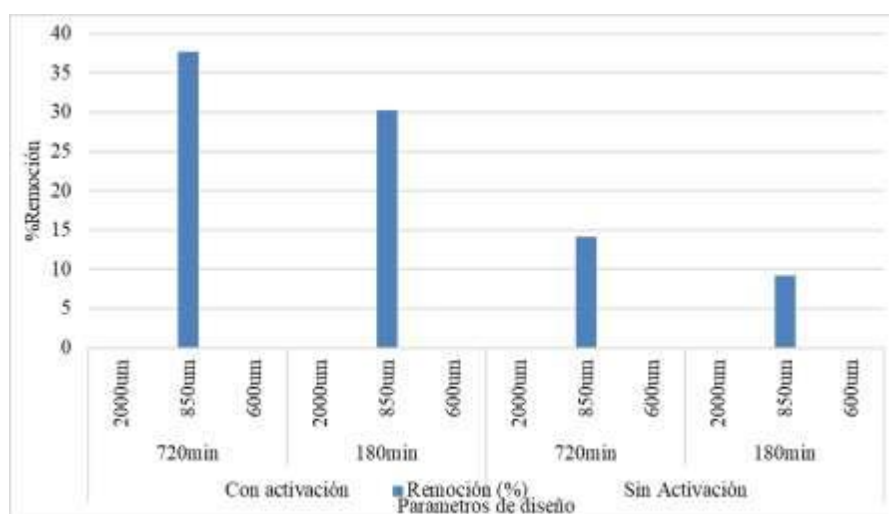


Figura 8. Tratamiento tamaño de partícula 850  $\mu\text{m}$  por Gustavo Murcia, 2020.

En estos tratamientos se observan similitudes a los ya expuestos anteriormente, pero se destaca cómo el Tratamiento 5 logró un poco más del doble de la remoción a la que se obtuvo con el Tratamiento 7, evidenciándose el efecto positivo que causa la activación de la cascarilla por medio del peróxido de hidrógeno y deduciendo que el tamaño de partícula al reducirse potencializa el tratamiento generando aumento en el porcentaje de remoción de todos ellos.

En el Tratamiento 8 se aprecia una remoción del 9,25%, valor muy cercano al del Tratamiento 3 presentado en la Tabla 4. Al variar el tamaño de partícula y considerando un tiempo de retención menor que el del Tratamiento 3 se obtiene un valor muy similar, evidenciando y reafirmando que el tamaño de partícula al ser menor aumenta el resultado del tratamiento que en este caso es el porcentaje de remoción.

Tabla 6.

*Tratamiento tamaño de partícula 600  $\mu$ m.*

Tratamiento	Tiempo de retención (min)	Activación	Concentración inicial de Cr (vi) mg/l	Concentración final de Cr (vi) mg/l	Remoción mg/L	Remoción %
9	720	Si	1,62	0,11	1,51	93,20
10	180	Si	1,62	0,60	1,02	62,96
11	720	No	1,62	0,65	0,97	59,87
12	180	No	1,62	0,93	0,69	42,59

Nota: Datos de tratamientos en diferentes tiempos de retención por Gustavo Murcia, 2020.

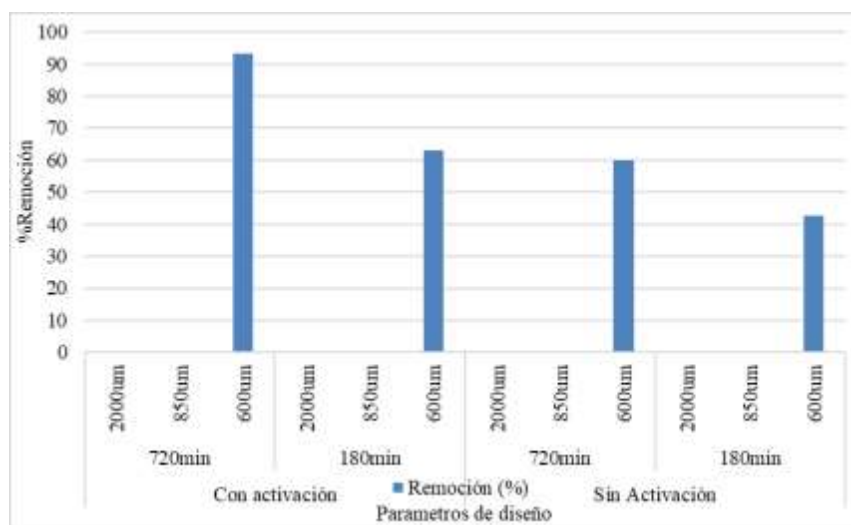


Figura 9. Tratamiento tamaño de partícula 600  $\mu$ m por Gustavo Murcia, 2020.

En la Figura 9, se puede observar el valor más alto de remoción obtenido durante esta investigación se presentó el Tratamiento 9 alcanzando una remoción superior a la del 93%, asimismo, se observa como la remoción del Tratamiento 12 es considerablemente superior al resto

de los demás tratamientos realizados sin activación de la cascarilla y con tiempo de retención de 180min, relacionando directamente este aumento de remoción con el tamaño de partícula del sustrato, siendo el de 600 $\mu$ m el sustrato con mayor remoción presentada por efectos de biosorción. De la misma forma, se evidencia en estos la influencia de la activación en la cascarilla pues pasamos de una remoción de casi del 60% correspondiente al Tratamiento 11 a una que incremento más de un 30%, cuando la única diferencia en los procedimientos de estos tratamientos (11 y 9) fue la activación de la cascarilla con peróxido de hidrógeno.

Tabla 7.

*Resultados tratamientos.*

Tratamiento	Tamaño de partícula ( $\mu$ m)	Tiempo de retención (min)	Activación de Peróxido de hidrógeno	Concentración inicial de Cr (vi) mg/l	Concentración final de Cr (vi) mg/l	Remoción mg/l	Remoción %
1	2000	720	Si	1,62	1,35	0,27	16,6
2	2000	180	Si	1,62	1,44	0,18	11,11
3	2000	720	No	1,62	1,45	0,17	10,49
4	2000	180	No	1,62	1,53	0,09	5,55
5	850	720	Si	1,62	1,01	0,61	37,65
6	850	180	Si	1,62	1,13	0,49	30,24
7	850	720	No	1,62	1,39	0,23	14,19
8	850	180	No	1,62	1,47	0,15	9,25
9	600	720	Si	1,62	0,11	1,51	93,20
10	600	180	Si	1,62	0,60	1,02	62,96
11	600	720	No	1,62	0,65	0,97	59,87
12	600	180	No	1,62	0,93	0,69	42,59

Nota: Datos de tratamientos en diferentes tiempos de retención por Gustavo Murcia, 2020.

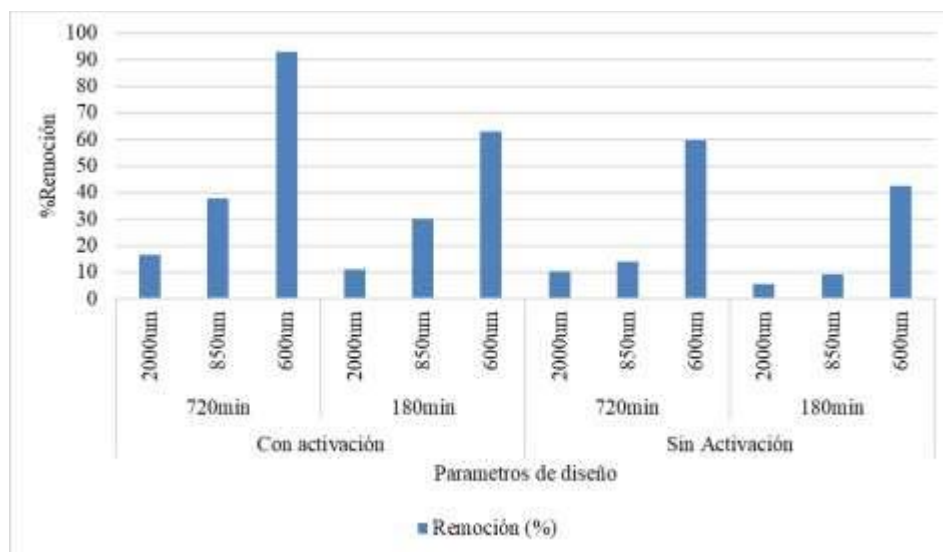


Figura 10. Tratamientos de remoción por Gustavo Murcia, 2020.

En la Figura 9, se puede observar los tratamientos realizados en la totalidad de la investigación donde los números impares son los tratamientos que coinciden en un tiempo de retención de 720 minutos y los números pares con un valor de 180 minutos.

Según los resultados obtenidos por (Doria, Hormaza, & Gallego, 2010) con un porcentaje de remoción de 90% se puede comprobar que la cascarilla de arroz puede presentar remociones sin necesidad de activación; sin embargo, a partir de los resultados obtenidos en este estudio, la activación con peróxido de hidrógeno, garantiza una mejoría de un 3% de remoción alcanzando en el caso del tratamiento de menor tamaño de partícula (600µm) y mayor tiempo de exposición (720min) una remoción de hasta el 93% del Cromo contenido en la muestra de sintética, este estudio permite demostrar que la activación con peróxido permite disminuir los gastos de monitoreo continuo del tratamiento, limitando las mediciones a lapsos de 4 horas.

La cascarilla de arroz se usó como biomasa para la remoción de un metal pesado como lo es el cromo y logro remover hasta el 93% de la concentración contenida en muestra, siendo este valor superior a lo que se obtuvo en el año 2015 cuando se utilizó como biomasa el mesocarpio del coco, la mazorca de maíz y la caña de azúcar para remover cadmio contenido en agua contaminada a escala laboratorio, metal pesado el cual posee características similares al cromo dando esto la viabilidad de que la cascarilla no solo se implemente en cromo sino en otros metales pesados y esto se debe a sus características propias que obtiene por ser proveniente del proceso industrial del arroz (Vera, 2015).

A pesar de que en este trabajo no se logró implementar como se deseaba desde un principio el realizar la activación química por medio del reactivo fenton, se determina que el peróxido de hidrógeno logró cumplir con las expectativas que se tenía puesto que al adicionarse en la cascarilla para dar proceso a la activación en los tratamiento se ve un aumento considerable en lo que respecta al porcentaje de remoción siendo un reactivo capaz de adherirse fácilmente al área superficial de la cascarilla dando esto una alternativa a la implementación de fenton en procesos donde se requiera remover contaminantes pues es un reactivo mucho más fácil de conseguir y los implementos de seguridad para la manipulación de este son básicos (Gallego, 2016).

A partir del análisis anterior se realizó una prueba de correlación de Pearson para definir como las variables están relacionadas directamente con el porcentaje de remoción obtenido en cada tratamiento, a continuación, se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 8.

*Correlación de las variables de estudio con respecto al porcentaje de remoción.*

<b>Variables correlacionadas</b>	<b>Coefficiente de correlación de Pearson</b>
Tamaño de partícula respecto al porcentaje de remoción	-0.7
Tiempo de retención respecto al porcentaje de remoción	0.22
Activación química respecto al porcentaje de remoción	0.35

Nota: Correlación de las variables de estudio por Gustavo Murcia, 2020.

Según los resultados obtenidos por medio del análisis estadístico de correlación de Pearson se puede determinar, que existe una correlación alta entre el tamaño de partícula y el porcentaje de remoción obteniendo un valor correspondiente al de -0.70; este valor es negativo debido a que estas variables tienen correlación inversa, es decir, que a medida que se reduce el tamaño de partícula de la cascarilla de arroz en los tratamientos se aumenta el porcentaje de remoción

(Gallego, 2016). Este análisis se puede verificar en el transcurso de esta investigación pues si bien en la hipótesis se aluce a la idea de que la activación química aumentara el porcentaje de remoción de los tratamientos a realizar no se le atribuye a este parámetro como el único a inferir para disminuir la concentración de cromo presente en las muestras.

Asimismo, si se compara el Tratamiento 9 con el Tratamiento 1 y 5, se puede evidenciar que la única variable que no tienen en común en cuanto al valor de ella es la correspondiente a la del tamaño de partícula de la cascarilla de arroz, pues con solo realizar variación en este parámetro se pasó de obtener un porcentaje de remoción correspondiente al 16,6 % (Tratamiento 1) a 37.65% (Tratamiento 5) y finalmente el correspondiente al de 93.2% (Tratamiento 9).

Al correlacionar el tiempo de retención con respecto al porcentaje de remoción se obtiene un valor de 0.22, este valor es positivo debido a que estos dos parámetros tienen relación de manera directa lo cual indica que al aumentar el tiempo de retención se produce un aumento en porcentaje de remoción de los tratamientos, esta afirmación se puede constatar por los tratamientos realizados durante esta investigación; sin embargo vemos que la correlación en cuanto al resultado obtenido se clasifica como una “correlación baja” esto se puede demostrar si se analiza el Tratamiento 11 con el Tratamiento 12 ya que estos cuentan con parámetros iguales en lo que respecta a la activación química y el tamaño de partícula que logro mayor remoción en este trabajo, no obstante, se diferencian en el tiempo de retención ya que en el tratamiento 11 tiene un valor de 720 minutos y en el tratamiento 12 un valor de 180 lo cual demuestra que uno es capaz de cuadruplicar en tiempo de contacto al otro pero en porcentaje de remoción se evidencia diferencia en el resultado de remoción a un valor equivalente al 17.28% dando esto un aumento de menos de la mitad correspondiente a la del tratamiento 12.

Se culmina este análisis al correlacionar la activación química con el porcentaje de remoción, donde se obtuvo un resultado equivalente a 0.35, es positivo porque al analizar los tratamientos se observa que al existir activación química en el sustrato se evidencia un incremento en el porcentaje de remoción, para dar soporte a esta afirmación se puede comparar los tratamientos “replicados” en donde solo existe la diferencia de que están activados químicamente con el peróxido de hidrógeno y se logró mayor porcentaje de remoción en el proceso (Gan & Wu, 2008). Asimismo, se puede evidenciar que esta técnica es viable para ser implementada en los procesos de tratamientos puesto que el mayor porcentaje de remoción que se obtuvo en estos procesos es el del Tratamiento 9 además de que claro esta contaba con el tamaño de partícula y el tiempo de retención

más eficientes según lo realizado en la presente investigación (TP: 600  $\mu$  y TR: 720min) (Domènech, Jardim, & Litter, 2014).

Se determina que el tratamiento más eficiente es aquel que tiene como parámetros el menor tamaño de partícula, un tiempo de retención correspondiente a 720 minutos y a su vez la cascarilla activada con peróxido de hidrogeno; tratamiento el cual obtuvo valores de remoción del 93% y superiores dando esto un incremento del 3% correspondiente al estudio de remoción de metales con cascarilla sin activar donde los resultados fueron del 90% (Doria, Hormaza, & Gallego, 2010).

De esta forma se confirma que la implementación del peróxido de hidrogeno como agente para la activación de la cascarilla es un factor determinante para la absorción de cromo. Este peróxido se encontraba a una concentración del 15% (Gan & Wu, 2008), asimismo, se demuestra mediante los resultados obtenidos y discutidos, que la cascarilla es un material alternativo para el tratamiento de aguas contaminadas con Cromo VI junto con una ventaja económica, al ser un material de bajo costo y de fácil implementación para el tratamiento a escala laboratorio.

La cascarilla de arroz es una materia prima de suma importancia para llevar a cabo los procesos de tratamiento de aguas con concentración de metales pesados. En este trabajo se demuestra la remoción de Cromo VI contenido en agua contaminada. Es plausible que también pueda ser usado este residuo (cascarilla de arroz) para la remoción de otros metales que presenten características similares de ecotoxicidad y aglomeración como lo pueden ser el Cadmio y el Plomo. Estos metales se pueden remover con residuos orgánicos, como han demostrado estudios previos (Vera, 2015). Lo que reafirma que la cascarilla es un sustrato viable para la remoción de estos metales pesados (Doria, Hormaza, & Gallego, 2010).

Al utilizarse un tratamiento de oxidación avanzada con activación, se observa que el resultado de remoción siempre fue superior al resultado del tratamiento con la cascarilla sin activar, esto se debe a que el peróxido de hidrógeno genera procesos fisicoquímicos (como el cambio de fase del contaminante, transformación química que genera la mineralización del contaminante en cuestión, reduce el uso de cloro para posteriores desinfecciones a hacer en las muestras de agua utilizadas hasta llegando a casos en que no es necesario el uso del mismo y no se generan lodos activados provenientes de los tratamientos realizados) los cuales causan gran cambio en la estructura del contaminante como del área superficial de la cascarilla causando esto mayor remoción del contaminante presente en el agua y que este se adhiera con mayor facilidad a la superficie activada de la cascarilla empleada. (Domènech, Jardim, & Litter, 2014).

## 9. Conclusiones

Por medio de este trabajo se puede responder la pregunta hipotética planteada al comienzo del mismo, los resultados demuestran de manera clara que al activar la cascarilla de arroz con el proceso avanzado de oxidación que en este caso es el peróxido de hidrógeno obtenemos mayor remoción de cromo con respecto a la cascarilla empleada en los tratamientos sin activación.

Los porcentajes de remoción de cromo demuestran el gran potencial absorbente de este residuo a ciertas dimensiones para el tratamiento de aguas, sin embargo, en futuros estudios es necesario evaluar esto en un escenario de sistema continuo para así aumentar la probabilidad del uso de esta propuesta como solución para el tratamiento de aguas puesto que al escalar la investigación e implementarla requiere de más componentes a interactuar para así poder generar un verdadero impacto industrial como social.

El tamaño de partícula y la activación química con peróxido de hidrogeno son los parámetros más relevantes en cuanto a los resultados de remoción de cromo, si el tamaño de partícula se reduce causa que exista mayor área superficial de la cascarilla que pueda tanto ser activada con el peróxido de hidrógeno y remueva mayor concentración de cromo contenido en las muestras de agua; Esto se soporta claramente con los resultados obtenidos en el desarrollo de este trabajo donde el Tratamiento 9 da como remoción un valor correspondiente al 93%.

El análisis de correlación de Pearson permite identificar de manera clara la dependencia e independencia que maneja cada variable en el proceso de tratamiento, analizar si estos parámetros se relacionan de manera directa o indirecta y que proporcionalidad tienen durante la elaboración de los tratamientos.

## 10. Recomendaciones

El tamaño de partícula al ser más pequeño aumenta considerablemente la eficiencia de la remoción por parte de la cascarilla por lo cual en futuros proyectos se recomienda hacer los tratamientos con tamaños más pequeños para así mejorar su eficiencia de remoción y poder compararse resultados con este trabajo.

En futuros proyectos si se desea implementar más a fondo este tipo de tratamiento para las aguas contaminadas se debería realizar un estudio en el cual el agua contaminada no solo contenga cromo en su concentración de metales pesados, sino que posea 2 o 3 metales más para así apreciar la interacción de estos con los componentes de la cascarilla y ver si aumenta o disminuye la remoción de los metales en el agua y más precisamente el cromo debido a que en este metal se basa el presente trabajo.

Se recomienda para futuros trabajos la implementación de alguna otra sustancia para la activación de la cascarilla, en el inicio de esta investigación se pretendía el utilizar el reactivo fenton como el agente activante, pero por condiciones no consideradas para la obtención de este no se pudo utilizar puesto que el generarlo exigía un reactivo el cual no se consigue con facilidad y a su vez su manejo y distribución es limitado.

Se recomienda seguir de manera adecuada la metodología que se usa para la realización del proyecto, pues no es nada viable saltarse actividades para la obtención de resultados de manera más rápida ya que simplemente se estarían generando resultados poco confiables.

Se recomienda que para la lectura de las concentraciones de las muestras se utilice un espectrofotómetro uv/vis debido a que este permite dar lectura a las concentraciones de la muestra de manera rápida y sencilla. Aunque existen otros métodos por los cuales se puede dar lectura a la concentración de las muestras, pero quizás el rango del resultado varié, se necesite de mayor disponibilidad de tiempo y equipos además de que se considera que el espectrofotómetro proporciona un valor más exacto ya que permite hacer varias veces la lectura de los tratamientos.

El lavado de la cascarilla antes del inicio del tratamiento para el proceso de remoción del metal pesado es sumamente importante debido a que este lavado permite que la superficie de la cascarilla este más limpia logrando dar eficiencia y eficacia al proceso de remoción debido a que la cascarilla cuando se obtiene de la fabricación del arroz viene con polvo y material particulado adherido a su

superficie la cual a la hora de poner en la muestra, afectaría de manera directa la concentración del contaminante, el porcentaje de remoción en el proceso de tratamiento junto con la tonalidad de la muestra en el momento de ser vista por el espectrofotómetro con la técnica de uv/vis.

En el momento de realizar el lavado de la cascarilla se recomienda realizar un lavado de solo agua destilada y en lo posible que la cascarilla estuviera a una agitación constante por lo menos unos 15 minutos, esto con el fin de que la superficie de la cascarilla quede limpia y así aumentar el área que podrá abarcar el cromo cuando se esté removiendo del agua por el tratamiento específico.

### Referencias bibliográficas

- Babativa, I., & Caicedo, J. (2018). *Evaluación de la presencia y distribución de los metales pesados cromo, níquel y plomo en el río ocoa, en la zona comprendida entre la desembocadura del caño maizaro hasta el puente murujuy, municipio de Villavicencio - Meta. Trabajo de grado*. Universidad Santo Tomás, Villavicencio Colombia. Disponible en el sitio web de la fuente, <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/12075/2018ivonbabativa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Barba, E. (2002). *Conceptos básicos de la contaminación del agua y parámetros de medición*. Recuperado el 09 de abril del 2020, del sitio web <Http://Www.Bvsde.Paho.Org/Bvsaar/E/Fulltext/Gestion/Conceptos.Pdf>
- Buenfil, M. &. (2007). *Determinación de metales pesados (As, Cd, Hg y Pb) presentes en el río hondo, Quintana Roo*. Recuperado el 19 de marzo de 2020, del sitio web [Http://Web.Uaemex.Mx/Red\\_Ambientales/Docs/Congresos/Chihuahua/Docs/81-100.Pdf](Http://Web.Uaemex.Mx/Red_Ambientales/Docs/Congresos/Chihuahua/Docs/81-100.Pdf)
- Carlos S. (2013). *Manual de métodos analíticos para la determinación de parámetros fisicoquímicos básicos en agua*. Cartagena de Indias. Recuperado el 25 de marzo del 2020, del sitio web [https://www.researchgate.net/publication/329153132\\_Manual\\_de\\_Metodos\\_Analiticos\\_para\\_la\\_Determinacion\\_de\\_Parametros\\_Fisicoquimicos\\_Basicos\\_en\\_Aguas](https://www.researchgate.net/publication/329153132_Manual_de_Metodos_Analiticos_para_la_Determinacion_de_Parametros_Fisicoquimicos_Basicos_en_Aguas)
- Candelaria, T. A., Villabona O. & Garcés J. (2014). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. Cartagena. *Vol (3), p., 9 - p.,10*. Recuperado el 2 de marzo del 2020 de la base de datos Dialnet <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5062883.pdf>
- Cañizares. (2000). Biosorción de metales pesados por el uso de biomasa microbiana. *Revista Latinoamericana de Microbiología, Vol (42), p.,131- p.,143*. Recuperado el 23 de marzo del 2020, de la base de datos Medigraphic.<https://www.medigraphic.com/pdfs/lamico/mi-2000/mi003f.pdf>

- Chata, A. (2015). *Presencia de metales pesados (Hg, As, Pb y Cd) en agua y leche en la cuenca del río Coata. Trabajo de grado*. Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Peru. Disponible en el sitio web de la fuente, [Http://Repositorio.Unap.Edu.Pe/Bitstream/Handle/Unap/1930/Chata\\_Quenta\\_Ayd e.Pdf?Sequence=1&Isallowed=Y](http://Repositorio.Unap.Edu.Pe/Bitstream/Handle/Unap/1930/Chata_Quenta_Ayd e.Pdf?Sequence=1&Isallowed=Y)
- Combariza, D. A. (2009). *Contaminacion por metales pesados en el embalse del muña y su relacion con los niveles en sangre de plomo, mercurio y cadmio y alteraciones de salud en los habitantes del municipio de sibaté (cundinamarca) 2007. Trabajo de grado*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Disponible en el sitio web de la fuente, [Http://Www.Bdigital.Unal.Edu.Co/2341/1/597588.2009.Pdf](http://Www.Bdigital.Unal.Edu.Co/2341/1/597588.2009.Pdf)
- Cordero, J. (2015). *Fitorremediación In Situ Para La Recuperación De Suelos Contaminados Por Metales Pesados (Plomo Y Cadmio) Y Evaluación De Selenio En La Finca Furatena Alta En El Municipio De Útica (Cundinamarca). Trabajo de grado*. Universidad Libre de Colombia, Bogotá, Colombia. Disponible en el sitio web de la fuente, [https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/7958/Fitorremediaci%C3%B2n%20in%20situ%20para%20la%20remoci%C3%B2n%20de%20metales%20pesados%20\(plomo%20y%20cadmio\)%20y%20evaluaci%C3%B2n%20de%20sel.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/7958/Fitorremediaci%C3%B2n%20in%20situ%20para%20la%20remoci%C3%B2n%20de%20metales%20pesados%20(plomo%20y%20cadmio)%20y%20evaluaci%C3%B2n%20de%20sel.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Cormacarena. (2001). *Formulación del Plan de Ordenamiento de las fuentes hidricas priorizadas en jurisdiccion de Cormacarena. Villavicencio*. <http://www.cormacarena.gov.co/descargarpdf.php?libro=2136>
- Coto, O. (2013). *Estudios De Bioacumulación De Un Metal De Interés En Contaminación Ambiental (Plomo) En Larvas De Lubina De Gran Valor Comercial. Trabajo de grado*. Universidad de Cádiz de España, Andalucía, España. Disponible en el sitio web de la fuente, <https://rodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/17347/TFG%20%20Jose%20Oscar%20Coto%20Reyes%20Dic%202014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Das, K. & Vimala, R. (2008). Biosorption of heavy metals. *Indian Journal of Biotechnology*, Vol (7), p.,159-169. <http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/1822/1/IJBT%207%282%29%20159-169.pdf>

- Delgado J. (2012). *Estudio de la contaminación por metales pesados en la cuenca bajo del rio Guadania*. Recuperado el 13 mayo del 2020, del sitio web [http://www.ehu.es/sem/macla\\_pdf/macla14/Macla14\\_057.pdf](http://www.ehu.es/sem/macla_pdf/macla14/Macla14_057.pdf)
- Diaz, R., Fernandez, G., Peinado, M., & Túnez J. (2008). Espectrofotometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas. Recuperado el 13 mayo del 2020, del sitio web [https://www.uco.es/dptos/bioquimica-biol-mol/pdfs/08\\_ESPECTROFOTOMETRIA.pdf](https://www.uco.es/dptos/bioquimica-biol-mol/pdfs/08_ESPECTROFOTOMETRIA.pdf)
- Domenech, J. & Litter, C. (2014). *Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes*. Recuperado el 14 de abril del 2020, del sitio web [https://mail-attachment.googleusercontent.com/attachment/u/0/?ui=2&ik=d3477b853e&attid=0.1&permmsgid=msg-f:1637180587907202623&th=16b86f120f5fbc3f&view=att&disp=inline&realattid=f\\_jx9n7ek90&sadbat=ANGjdJ9xVwy0CoC\\_VHBKklAWljjBA3AS5nDspIIJpYsfky5DOn0Wezs\\_](https://mail-attachment.googleusercontent.com/attachment/u/0/?ui=2&ik=d3477b853e&attid=0.1&permmsgid=msg-f:1637180587907202623&th=16b86f120f5fbc3f&view=att&disp=inline&realattid=f_jx9n7ek90&sadbat=ANGjdJ9xVwy0CoC_VHBKklAWljjBA3AS5nDspIIJpYsfky5DOn0Wezs_)
- Doria, G., Hormaza, A., & Gallego, D. (2010). *Cascarilla de arroz: material alternativo y de bajo costo para el tratamiento de aguas contaminadas con Cromo (VI)*. Recuperado el 28 de marzo del 2020, <https://www.redalyc.org/html/1694/169422215006/>
- Eduardo, L., & Triana, S. (2007). *Estudio de antecedentes sobre la contaminación hídrica en Colombia*. Recuperado el 17 de marzo del 2020, del sitio web <Http://Cdim.Esap.Edu.Co/Bancomedios/Documentos Pdf/Estudio De>.
- Gallego, N. (2016). *Comparación del potencial de eliminación de cromo (vi) contenido en aguas a nivel de laboratorio a través de las propiedades de residuos provenientes de una agroindustria por medio de la técnica de biosorción*. Bogotá D.C. Trabajo de grado. universidad santo tomás. Disponible en el sitio Web de la fuente, <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/2893>
- Gan, & Wu. (2008). Sorption of Pb (II) using hydrogen peroxide functionalized activated carbon. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 330, 91-95. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927775708004913>
- García, R., Campos, J., Cruz, J. A., Calderón, M. E., & Buitrón, m. E. ( 2016 ). Biosorción de Cd, Cr, Mn y Pb de soluciones acuosas industriales por cepas de Bacillus sp Aisladas de lodos activados. *Propina*, 19(1), 5-14. <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=64177>

- GilPavas, D., & Gómez. (2017). Coagulation-flocculation sequential with Fenton or Photo-Fenton processes as an alternative for the industrial textile wastewater treatment. *Journal of Environmental Management, Elsevier*(191), 189-197.  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28092755/>
- González, J. (2009). *Manual Básico SPSS*. Obtenido de Universidad de Talca:  
[https://www.fibao.es/media/uploads/manual\\_basico\\_spss\\_universidad\\_de\\_talca.pdf](https://www.fibao.es/media/uploads/manual_basico_spss_universidad_de_talca.pdf)
- Guerree, C. G. (1977). *Tratamiento de aguas para abastecimiento público*. paris: Eyrolles.
- Lozano, G. (2010). *Metales Pesados: Aportaciones Al Estudio Toxicológico De Especies Y Alimentos Marinos En Las Islas Canarias*. Obtenido de  
<Ftp://H3.Bbtk.Ull.Es/Ccppytec/Cp334.Pdf>
- Lozano, G. (2010). *Metales Pesados: Aportaciones Al Estudio Toxicológico De Especies Y Alimentos Marinos En Las Islas Canarias*. Universidad de la Laguna. Obtenido de  
<Ftp://H3.Bbtk.Ull.Es/Ccppytec/Cp334.Pdf>
- Martín, A. M.-N.-N. (2016). *Bio- Nanotechnology For sustainable Environmental Remediation and Energy Production* ( (E. González & E. Forero, Eds. ed.). Bogotá: Bio-nano.  
<http://www.journalnano.org/?p=682>
- Mejía, D. (2014). *Monitoreo Hidrológico y Físico químico del río Ocoa del Municipio de Villavicencio, en zona de vertimientos industriales*. Villavicencio: Observatorio de Políticas Públicas de Villavicencio.
- Mero, M. (2010). *Determinación De Metales Pesados (Cd Y Pb) En Moluscos Bivalvos De Interés Comercial De Cuatro Esteros Del Golfo De Guayaquil*. Obtenido de Repositorio.Ug.Edu.Ec, 63. <https://doi.org/10.1029/2011je003926>
- Morales, P., & Rojas, R. (2018). *Evaluación de la presencia y distribución de arsénico y cadmio en el río ocoa en el municio de villavicencio-META*. Villavicencio: Facultad de Ingenieria Ambiental Usta.  
<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/13700/2018paulamorales.pdf?sequenc>
- OMS. (2006). *Guías Para La Calidad Del Agua Potable*. Obtenido de  
[Http://Www.Who.Int/Water\\_Sanitation\\_Health/Dwq/Gdwq3\\_Es\\_Fulll\\_Lowsres.P df](Http://Www.Who.Int/Water_Sanitation_Health/Dwq/Gdwq3_Es_Fulll_Lowsres.P df)
- OMS. (2014). *Chromium in Drinking-water*. OMS. Obtenido de  
[https://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/water-quality/guidelines/chemicals/chromium.pdf](https://www.who.int/water_sanitation_health/water-quality/guidelines/chemicals/chromium.pdf)

- Piñeros, Y. (2014). *Aprovechamiento de biomasa lignocelulósica, algunas experiencias de investigación en Colombia*. Universidad Jorge Tadeo Lozano, Cundinamarca. UTADEO. Obtenido de [http://avalon.utadeo.edu.co/servicios/ebooks/2015/aprovechamiento\\_de\\_biomasa/files/assets/basic-html/page14.html](http://avalon.utadeo.edu.co/servicios/ebooks/2015/aprovechamiento_de_biomasa/files/assets/basic-html/page14.html)
- Rubio, D. I. (2015). Tratamientos Para La Remoción De Metales Pesados Comúnmente Presentes En Aguas Residuales Industriales. *Revista Ingeniería Y Región*, 13(1), 73-90. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5432290.pdf>
- Sarmiento Viteri, D. V. (2013). *Evaluación De La Contaminación Por Metales Pesados En Muestras De Musgo Recolectadas Durante El Período Febrero – Marzo 2011 En La Estación Antártica Ecuatoriana Pedro Vicente Maldonado*. Obtenido de <Http://Www.Dspace.Uce.Edu.Ec/Bitstream/25000/2114/1/T-Uce-0008-05.Pdf>
- Smith, B. C. (2011). *Fundamentals of Fourier Transformed Infrared Spectroscopy*. Taylor and Francis Group.
- Stuart, B. (2004). *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications*. John Wiley and Sons Ltd. Londres. Wiley.
- Supelco, J. (2018). *Test Cromatos Spectroquant. Darmstadt, Germany*. Recuperado el 15 de marzo del 2020, del sitio web [https://www.merckmillipore.com/INTERSHOP/web/WFS/Merck-CO-Site/es\\_ES/-/COP/ShowDocument-File?ProductSKU=MDA\\_CHEM-114758&DocumentId=22739.ProNet&DocumentType=PI&Language=ES&Country=NF&Origin=PDP](https://www.merckmillipore.com/INTERSHOP/web/WFS/Merck-CO-Site/es_ES/-/COP/ShowDocument-File?ProductSKU=MDA_CHEM-114758&DocumentId=22739.ProNet&DocumentType=PI&Language=ES&Country=NF&Origin=PDP)
- Trujillo, & Torres. (2015). *Niveles de contaminación en tres sectores de Villavicencio, a través del índice de geo-acumulación(I-geo)*, Vol (2) p.,12 - p.,14. <http://www.scielo.org.co/pdf/rori/v19n1/v19n1a10.pdf>
- Vera, L. (2015). *Bioabsorción alternativa para reducir la contaminación*. Recuperado el 13 abril del 2020, del sitio web <http://prometeo.educacionsuperior.gob.ec/biosorcion-una-alternativa-para-reducir-la-contaminacion/>
- Volesky, B. A. (2007). *Biosorption and me Water Research.. Vol (41), p., 4017- p.,4029*. Recuperado el 21 de abril del 2020 [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0717-34582004000100006](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-34582004000100006)

Yagnentkovsky, N. (2011). *Aplicación De Técnicas De Biorremediación Para El Tratamiento De Residuos Industriales Con Alto Contenido De Metales Pesados. Trabajo de Grado.* Universidad Nacional de la Plata, Plata, Argentina. Disponible de el sitio web de la fuente [Http://Sedici.Unlp.Edu.Ar/Bitstream/Handle/10915/2706/Documento\\_Completo.Pdf?Sequence=1](http://Sedici.Unlp.Edu.Ar/Bitstream/Handle/10915/2706/Documento_Completo.Pdf?Sequence=1)