

REMOCIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS PERSISTENTES Y MERCURIO
EN AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL POR MEDIO DE
NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS (MNPs) Y BIOMASA RESIDUAL DE
PLÁTANO

DIEGO ALEJANDRO RUIZ PIRAQUIVE

CÓDIGO: 507344

DIEGO FELIPE MONROY PEDRAZA

CÓDIGO: 507240



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TRABAJO DE GRADO

BOGOTÁ D. C.

2021

REMOCIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS PERSISTENTES Y MERCURIO
EN AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL POR MEDIO DE
NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS (MNPs) Y BIOMASA RESIDUAL DE
PLÁTANO

DIEGO ALEJANDRO RUIZ PIRAQUIVE

CÓDIGO: 507344

DIEGO FELIPE MONROY PEDRAZA

CÓDIGO: 507240

Trabajo de Grado

Director Trabajo de Grado

Wilfredo Marimon Bolívar, PhD.



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TRABAJO DE GRADO

BOGOTÁ D. C.

2021



Atribución-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-SA 4.0)

This is a human-readable summary of (and not a substitute for) the [license](#). [Advertencia](#).

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

Adaptar — remezclar, transformar y construir a partir del material para cualquier propósito, incluso comercialmente.

La licenciente no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia



Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciente.



CompartirIgual — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, debe distribuir su contribución bajo la [misma licencia](#) del original.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia](#).

Nota de Aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C. Junio de 2021

DEDICATORIA

A Dios que me permitió cursar estos 10 semestres, cuidándome frente a todas las adversidades que se han presentado en el día a día.

A mis padres Germán y Emma que, con su amor, apoyo, esfuerzo, sabiduría y dedicación hicieron posible estar en este punto.

A mi hermana Laura quien con su ejemplo, ayuda, consejos y motivación me fortalecieron en cada momento.

A Camilo Sáenz por sus conocimientos, inteligencia y por estar ahí en cualquier momento dispuesto a ayudar.

Diego Felipe Monroy Pedraza.

Dedico esta tesis primero que todo a Dios quien es mi inspiración espiritual y apoyo indispensable para dar fin óptimo a este proyecto investigativo.

A mis padres Sergio y Janneth quienes me dieron educación, apoyo incondicional y consejos que me ayudaron a culminar con éxito mi carrera universitaria.

A mi hermana Tatiana que en todo momento estuvo presente y apoyando a superar cada dificultad presentada en este proceso académico.

A mis compañeros de estudio y maestros, quienes sin su ayuda no hubiera sido posible llegar a ese punto y realizar este punto. A todos gracias.

Diego Alejandro Ruiz Piraquive

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestro asesor de trabajo de grado Wilfredo Marimón quien nos abrió las puertas para hacer parte del semillero de investigación, el cual estuvo dispuesto a ayudarnos y guiarnos, interviniendo con la universidad para poder realizar los laboratorios para el desarrollo y culminación de este documento. A la Universidad Católica de Colombia quien dispuso de los equipos e instalaciones y personal para el desarrollo de este mismo. A cada uno de nuestros padres quien con su ayuda económica nos permitieron cursar este último semestre.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	14
INTRODUCCIÓN.....	15
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
2. JUSTIFICACIÓN	18
3. OBJETIVOS.....	20
3.1 GENERAL	20
3.2 ESPECÍFICOS	20
4. ESTADO DEL ARTE.....	21
5. MARCO DE REFERENCIA.....	24
5.1 MARCO TEÓRICO	24
5.1.1 Calidad del agua.	24
5.1.2 Parámetros de calidad del agua.	24
5.1.3 Contaminación del agua.	26
5.1.4 Tipos de contaminantes.	27
5.1.5 Utilización del agua en las industrias.....	28
5.1.6 Tratamiento de aguas residuales.....	29
5.1.7 Tratamientos de aguas residuales industriales.....	31
5.1.8 Adsorción.....	31
5.1.9 Adsorbentes no convencionales.	33
5.1.10 Uso de nanotecnología en el agua residual.....	33
5.1.11 Nanopartículas magnéticas.....	34
5.1.12 Biomasa residual.	34
6. MARCO CONCEPTUAL.....	36
7. MARCO LEGAL.....	37
8. ANTECEDENTES	39
9. ALCANCE Y LIMITACIONES.....	40
9.1 ALCANCÉ	40
9.2 LIMITACIONES.....	40
10. METODOLOGÍA.....	41

10.1	PREPARACIÓN DE AGUA RESIDUAL TEXTIL SINTÉTICA	41
10.2	CARACTERIZACIÓN DE AGUA RESIDUAL TEXTIL.....	43
10.3	PREPARACIÓN DE BIOMASA RESIDUAL DE CASCARA DE PLÁTANO	44
10.4	MATERIALES SÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS (<i>MNPs</i>)	45
10.5	PREPARACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE MAGNÉTICAS (<i>MNPs</i>)	45
10.6	PREPARACIÓN Y SÍNTESIS DE BIOMASA DE CÁSCARA DE PLÁTANO CON NANOPARTÍCULAS DE MAGNÉTICAS (<i>MNPs</i>).....	46
10.7	Caracterización de nanopartículas magnéticas (<i>MNPs</i>)	47
10.8	REALIZACIÓN DE ENSAYOS BATCH Y CONTINUO PARA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES.....	47
10.8.1	Ensayo Batch.....	47
10.8.2	Ensayo continuo columna de adsorción.....	48
11	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
11.1	CARACTERIZACIÓN DE NANOMATERIAL	49
11.1.1	Propiedades magnéticas.....	49
11.1.2	Cristalografía (XRD).	50
11.1.3	Espectro infrarrojo (FTIR).....	50
11.1.4	Caracterización de Biomasa Residual.....	51
11.1.5	Caracterización de Agua Sintética.....	52
11.2	EFFECTO DE PH	53
11.3	CINÉTICA DE ADSORCIÓN	54
11.4	ISOTERMAS DE ADSORCIÓN.....	57
11.5	SIMULACIÓN COLUMNA DE ADSORCIÓN (AZUL DE METILENO)....	62
11.5.1	Variación cantidad del material adsorbente.	62
11.5.3	Variación de concentración.	64
11.6	SIMULACIÓN COLUMNA DE ADSORCIÓN (MERCURIO).....	66
11.6.1	Variación cantidad del material adsorbente.	67
11.6.2	Variación de caudales	67
11.6.3	Variación de concentración	68
12	APLICACIÓN A ESCALA.....	69
12.1	Comparación con tecnologías existentes	69
13	CONCLUSIONES.....	71
14.	RECOMENDACIONES.....	72

15. BIBLIOGRAFÍA.....	73
16.ANEXOS	84

TABLA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Magnetización a temperatura (26.85° C) ambiente de <i>MNPs</i> obtenidas.	49
Gráfica 2. Patrón de difracción de Rayos X.	50
Gráfica 3. Espectros FTIR.....	51
Gráfica 4. pH de Biomasa Residual almacenada a 24° C durante 7 días.	52
Gráfica 5. Curva de calibración.....	53
Gráfica 6. Efecto de pH en la adsorción del contaminante.	54
Gráfica 7. Tiempo de equilibrio de capacidad de adsorción con biomasa.	55
Gráfica 8. Tiempo de equilibrio de capacidad de adsorción con <i>BiomasaResidual@MNPs</i>	55
Gráfica 9. Modelo lineal de cinética de adsorción con azul de metileno con <i>BiomasaResidual@MNPs</i>	56
Gráfica 10. Isoterma de adsorción para Azul de metileno con biomasa residual.	58
Gráfica 11. Linealización de modelos isotérmicos en la adsorción Azul de metileno con biomasa residual.	58
Gráfica 12. Isoterma de adsorción para Azul de metileno con <i>BiomasaResidual@MNPs</i>	60
Gráfica 13. Linealización de modelos isotérmicos en la adsorción Azul de metileno con <i>BiomasaResidual@MNPs</i>	60
Gráfica 14. Capacidad de adsorción con variación de biomasa residual y <i>BiomasaResidual@MNPs</i> mediante parámetros de Langmuir.	62
Gráfica 15. Capacidad de adsorción con variación de biomasa residual y <i>BiomasaResidual@MNPs</i> mediante parámetros de Freundlich.	63
Gráfica 16. Capacidad de adsorción con biomasa residual y <i>BiomasaResidual@MNPs</i> mediante parámetros de Langmuir variando caudales.	64

Gráfica 17. Capacidad de adsorción con biomasa residual y <i>BiomasaResidual@MNPs</i> mediante parámetros de Freundlich variando caudales.	64
Gráfica 18. Capacidad de adsorción con biomasa residual y <i>BiomasaResidual@MNPs</i> mediante parámetros de Langmuir variando concentración inicial.	65
Gráfica 19. Capacidad de adsorción con biomasa residual y <i>BiomasaResidual@MNPs</i> mediante parámetros de Freundlich variando concentración inicial.	66
Gráfica 20. Capacidad de adsorción <i>Ñame@MNPs</i> mediante parámetros de Langmuir y Freundlich.	67
Gráfica 21. Capacidad de adsorción con <i>Ñame@MNPs</i> variando de caudal mediante parámetros de Langmuir y Freundlich.	67
Gráfica 22. Capacidad de adsorción con <i>Ñame@MNPs</i> variando concentración inicial mediante parámetros de Langmuir y Freundlich.	68

TABLA DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Ilustración 1. Calidad del Agua.	24
Ilustración 2. Estructura química de compuestos orgánicos persistentes.	26
Ilustración 3. Contaminación del agua.	27
Ilustración 4. Tipos de contaminantes.	28
Ilustración 5. Contaminación de tintes por procesos textiles.	29
Ilustración 6. Problema de las aguas residuales.	29
Ilustración 7. Tratamiento de aguas contaminadas.	30
Ilustración 8. Proceso de adsorción.	32
Ilustración 9. Nanotecnología en agua.	33
Ilustración 10. Nano partículas magnéticas.	34
Ilustración 11 Marco Conceptual.	36
Ilustración 12. Compuestos persistentes.	42
Ilustración 13. Agua residual sintética.	42
Ilustración 14. Espectrofotómetro, multiparámetro, turbidímetro y ensayo de alcalinidad.	44
Ilustración 15. Lavado, macerado y secado de biomasa.	45
Ilustración 16. Materiales de síntesis de nanopartículas.	45
Ilustración 17. Preparación de nanopartículas magnéticas.	46
Ilustración 18. Coloración oscura y agitación.	46
Ilustración 19. Secado de <i>BiomasaResidual@MNPs</i>	47
Ilustración 20. Metodología	48

TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Variables Dependientes e Independientes.	41
Tabla 2. Muestra sintética de estudio.	43
Tabla 3. Métodos de medición.	43
Tabla 4 Caracterización de Agua Sintética	52
Tabla 5. Dilución azul de metileno con agua residual sintética	53
Tabla 6. Parámetros de la cinética de adsorción de Azul de metileno.	57
Tabla 7. Parámetros de las isotermas de adsorción con biomasa.	59
Tabla 8. Máxima capacidad de adsorción de azul de metileno con diferentes biomosas.	59
Tabla 9. Parámetros de las isotermas de adsorción con <i>BiomasaResidual@MNPs</i>	61
Tabla 10. Máxima capacidad de adsorción de azul de metileno con diferentes biomosas.	61
Tabla 11 Máxima capacidad de adsorción de azul de metileno con diferentes biomosas.	66
Tabla 12. Comparación costo de producción a gran escala para 1 g de adsorbentes aptos en remoción de Azul de metileno.	70

RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó la capacidad de remoción de contaminantes pertenecientes a los efluentes de aguas de la industria textil como lo es el Azul de metileno y el mercurio; mediante la síntesis de un material compuesto por nanopartículas de magnetita y biomasa residual de cascara de plátano. Para el desarrollo se caracterizó el nanomaterial mediante la curva de saturación magnética, estructura cristalográfica (XRD), espectro FTIR para la determinación de grupos funcionales. Así mismo, se midió diferentes parámetros fisicoquímicos del agua residual (pH, temperatura, conductividad, alcalinidad, TDS, dureza y color) antes y después del proceso.

Para llevar a cabo la evaluación de la capacidad de adsorción se elaboraron ensayos Batch y continuo, este último mediante la simulación en el software Fast 2.1 beta. Para el desarrollo de los ensayos Batch se utilizaron las metodologías de cinética e isothermas de adsorción, en donde se aplicaron modelos lineales (Pseudo Primer Orden, Pseudo-Segundo Orden, Elovich y Difusión Intraparticular) e isotérmicos (Langmuir y Freundlich), Por consiguiente, nos permitió comparar y evaluar la capacidad máxima de adsorción (q_m) con otros materiales que se usan en la remoción de estos contaminantes. En este sentido, se calculó el valor de producción del material a gran escala y así poder compararlo con métodos convencionales.

Los resultados obtenidos demuestran que la BiomasaResidual@MNPs es un material eficaz para la remoción de los distintos contaminantes a nivel de costos. Fruto de ello, con una capacidad máxima de adsorción $q_m=0,490$ mg/g y una eficiencia de remoción de 55% de las nanopartículas sintetizadas con cascara de plátano requiere un costo de producción por gramo de 0.7669 US\$/g.

INTRODUCCIÓN

En los del siglo XXI, la mayor de las preocupaciones para el hombre es la preservación de los ecosistemas naturales del planeta Tierra. “A mediados de 1992 se llevó a cabo en Rio de Janeiro - Brasil, la Cumbre Ecológica Mundial, con la asistencia de líderes de todos los países en los campos de control y manejo de los recursos naturales”¹. Con la realización de esta cumbre se destacaron importantes temas ecológicos como lo fueron la manutención de la diversidad biológica, la afectación la capa de ozono, la elevación en la temperatura a nivel mundial y el control de los agentes contaminantes; este último tema mencionado es de vital relevancia para el desarrollo del presente proyecto investigativo ya que da paso a hablar sobre el agua potable, por ende se postula como el problema de más trascendencia en el cuidado de la raza humana.

En el progreso de la Ingeniería Civil a lo largo de los años se vienen desarrollando nuevos procesos que ayuden a mitigar la contaminación como los sistemas de tratamiento para efluentes contaminados. No obstante, existen deficiencias en la disposición de estas aguas; como lo expone el Ingeniero Civil Juan José Mariño en su artículo donde reflexiona sobre el papel que tiene la ingeniería en la evolución del medio ambiente y toma como ejemplo la sabana de Bogotá, citando textualmente “En la ciudad de Bogotá capital colombiana, se ha fallado gravemente en la solución de los problemas ambientales generados por el vertimiento directo de aguas residuales al río Bogotá. Aunque, se dan explicaciones relacionadas con limitaciones de capacidad económica, no existen excusas válidas para haber dejado incrementar el problema sanitario y ambiental al nivel al que llegó”².

Este tipo de investigaciones generan conciencia, para aportar a esta problemática mundial nuevas soluciones y técnicas para el tratamiento de aguas residuales, conllevando a métodos novedosos para analizar los efluentes en este tipo de aguas y su eficiencia de descontaminación. Se han presentado avances significativos con relación al uso de la nanotecnología en procesos de tratamientos para aguas residuales, lo que da paso a generar nuevos estudios. Permitiendo así, mejorar el control de contaminación y a la vez incursionar en combinaciones innovadoras que permitan ayudar a mitigar impactos ambientales utilizando residuos alimenticios, que se generan a diario en todo el mundo.

Por lo anterior, el presente proyecto busca implementar nuevos procesos para tratar aguas residuales industriales textiles, preparando una muestra de agua residual textil sintética. Para el tratamiento se usará la síntesis de nanopartículas magnéticas y la biomasa residual de plátano, removiendo y analizando compuestos orgánicos persistentes (azul de metileno como compuesto representativo) y mercurio, mediante ensayos Batch y continuo, estableciendo la capacidad de adsorción mediante la caracterización de las concentraciones al inicio y final del proceso.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad los recursos naturales cada vez tienen menor disponibilidad, el agua es uno de estos según la revista QuimicaViva “el agua es uno de los bienes más preciados para la vida en nuestro planeta”. También, considerando que sólo hay dos fuentes de agua utilizables por el hombre, a saber: las superficiales y las subterráneas y que éstas sólo constituyen el 0,4% del total disponible”¹, sumado a que con lleva a pensar que los procesos de afectación de estas, comprimen aún más su acceso. Razón por la cual, está es la razón más importante para ayudar y contribuir a reducir en gran proporción el agua contaminada.

La contaminación en las fuentes hídricas como resultado del derramamiento de aguas residuales sin tratamiento o incompleto, es un fenómeno que como resultado del desarrollo industrial, como es el caso de la industria textil, ya que es de las más importantes en Colombia. Sin embargo, es una de las industrias con mayor gasto de agua y a su vez generan gran volumen de aguas que contienen contaminantes de diferente origen. Entre las magnas inquietudes que genera el derrame de aguas descompuestas sobre los cuerpos de agua, “se resalta el hecho de que su toxicidad. Además de los impactos estéticos negativos ocasionados frecuentemente por el vertimiento de colorantes y pigmentos, afecte organismos acuáticos”², debido a esto su complejidad de remoción es alta.

A lo largo de los años las industrias, en especial la industria textil, se han aprovechado en forma deliberada de los elementos que componen la naturaleza, debido esencialmente a técnicas de fabricación y servicios inútiles, lo que en consecuencia genero una disminución de la capacidad de adquirir agua limpia para variados usos³. Estas aguas residuales presentan grandes cantidades de compuestos orgánicos, tintes y productos químicos necesarios para las distintas etapas de fabricación, revelando efectos ecotoxicológicos notables, además de algunos estudios en donde se encontraron elementos presentes como isómeros de nonilfenol, alcohol polietoxilado, etoxilatos de nonilfenol y varios ftalatos⁴, parámetros que aumentan la toxicidad en estos efluentes y que pueden generar graves problemas de salud a las personas que en algún momento puedan utilizar o consumirlas.

Las aguas residuales textiles son una de las causas de la degradación ambiental y enfermedades en los seres humanos, en promedio el 40% de los colorantes que se utilizan en todo el mundo presentan cloro unido orgánicamente este compuesto es un cancerígeno conocido⁵. Adicionalmente, que son estables y resistentes a tratamientos biológicos, físicos y químicos esto genera que su eliminación completa sea compleja. Uno de los colorantes de más uso en varias industrias es el Azul de metileno, ya que es usado en las industrias biológicas, medicina y textil. Siendo esta última, usada principalmente para teñir algodón, seda y madera razón de que sea muy común la presencia de este compuesto en estas aguas residuales, causando

efectos atroces al medio ambiente. Además, es posible que estos productos químicos se evaporen en el aire que respiramos o por medio de contacto físico con la piel aparezcan reacciones alérgicas que pueden causarle daño a los niños incluso antes de su nacimiento. Otros de los compuestos presentes en estas aguas son los metales pesados como mercurio, plomo, arsénico y cadmio generados durante el proceso de teñido⁶, estos no son biodegradables lo que genera acumulación en los cuerpos de agua y generando así distintos síntomas de enfermedades en la sociedad⁷. Estos contaminantes tóxicos tienden a mantenerse indefinidamente en el ambiente, afectando la estabilidad de la fauna y la flora presente en los ecosistemas⁸.

Es un reto encontrar alternativas para la remoción de contaminantes amigables con el medio ambiente y así evitar las enfermedades que pueden llegar a generar estos compuestos. De igual forma, esto con lleva a analizar algunas actividades también que generan altos grados de contaminación como es la agricultura, en Colombia se cultiva gran cantidad y variedad de plátano, según el DANE, para el año 2019 la producción de plátano fue de alrededor de 3 millones de toneladas, lo que conlleva a que la biomasa residual generada por este producto sea una de materias primas que se está desperdiciando, sugiriendo que es propenso a pensar en la innovación de procesos de tratamiento de aguas residuales usando este tipo de compuestos⁹.

Según lo mencionado anteriormente, el presente proyecto busca identificar una solución alternativa a esta problemática: ¿Cuál es la eficiencia de la implementación de un compuesto con nanopartículas magnéticas y de Biomasa Residual de plátano, para la eliminación de metales y compuestos orgánicos persistentes en aguas industriales textiles?

2. JUSTIFICACIÓN

La manufactura textil esta un escalón por encima de la industria del petróleo, la segunda que tiene como principales afectaciones en la naturaleza por el alto gasto del recurso hídrico y las aguas residuales con alta carga contaminante. El sector textil y confecciones es un oficio complicado ya que relaciona extensas y diferentes procesos de provisión y fabricación de materias primas, los cuales del 10% al 15% de la cantidad de colorantes utilizada en la industria textil no se fija a la fibra y es vertida en los efluentes o alcantarillas como desechos contaminantes¹⁰.

Así mismo, se consumen 54 millones de toneladas de fibras naturales/Año, un 1 millón de toneladas de colorantes y 7 millones de químicos para procesamiento textil/Año. El algodón es una de las materia primas más utilizadas por industria, que consume agua en su proceso de tintura: 30 - 150 L/kg de material textil¹¹. Un par de jeans necesita un mínimo de 42 litros de agua para ser teñidos, lavados y acabados. Una vez en casa, usamos todavía más agua, cuidándolos; usando, 21 litros cada vez que los lavamos¹². Por cada kilo de producto acabado (prenda) se emite 3,6 kg de CO₂ equivalente¹³.

En la actualidad, por el crecimiento de la población no solo se presenta desechos industriales, si no también desechos orgánicos, en el país el grupo de tubérculos y plátanos representa el 50,7 % del total del área agrícola cosechada, correspondió a cultivos de plátano, seguido de yuca con el 26,7 %, papa con el 10,4 % y otros tubérculos con el 12,2 %. Respecto a la producción, el plátano presentó la mayor participación con el 37,3 %, seguido de la yuca con el 37,6 %, la papa con el 21,2 % y los otros tubérculos con una producción de 4,0 % de toneladas¹⁴. La planta de plátano es un recurso natural que no es explotado eficientemente por el cultivador, ya que una vez que produce el racimo, la planta es cortada quedando como abono para la cosecha, al igual su cáscara que es considerada como desecho representando entre el 35 % y el 40 % del plátano¹⁵. El mal aprovechamiento de estos desechos agrícolas provoca contaminación de suelos, aguas subterráneas, proliferación de bacterias y enfermedades por su descomposición abierta sin ningún control¹⁶.

Para tratar las aguas residuales se presentan una variedad de soluciones, entre ellas las mencionadas en los antecedentes, destacando la nanotecnología y la biomasa residual que generan una alternativa innovadora como productos útiles para la desinfección, eliminación de sustancias químicas y biológicas incluyendo metales (cadmio, cobre, plomo, mercurio, níquel, zinc)¹⁷ y tratamiento de agua residuales, además de ser amigable con el medio ambiente y accesible por sus bajos costos, comparado con los métodos convencionales.

Hoy en día se está generando estudios en donde se utilizan la combinación de biomasa residual y nanotecnología, en la adsorción de metales pesados en aguas

industriales como es el caso del estudio de la Universidad de Cartagena en el año 2018 en donde utilizando cascara de ñame (*MNP-YP*) y nanopartículas de magnéticas (*MNP_s*), se logró una adsorción de mercurio en un 75% analizando el pH de la muestra¹⁸, este tipo de estudios permiten seguir con la investigación de nuevos materiales para implementarlos en nuevos procesos de tratamiento de aguas y a su vez mejorar los procesos para la remoción de contaminantes.

3. OBJETIVOS

3.1 GENERAL

Estudiar la eliminación de compuestos orgánicos persistentes y mercurio en aguas industriales textiles, por medio de nanopartículas magnéticas (*MNPs*) y biomasa residual de plátano.

3.2 ESPECÍFICOS

- Preparar y caracterizar la composición del agua residual proveniente de la industria textil.
- Sintetizar y caracterizar un material compuesto por nanopartículas magnéticas y biomasa residual de plátano.
- Establecer las condiciones favorables de implementación (Batch y continuo) del adsorbente para la remoción de los contaminantes de estudio.

4. ESTADO DEL ARTE

Como consecuencia del crecimiento exponencial que presenta la población mundial con el paso del tiempo, el problema que afecta el planeta tierra es la contaminación del agua. “Esta se produce por el vertimiento en ella de un elemento o compuesto, orgánico o inorgánico, disuelto, disperso o suspendido, alcance una concentración que exceda la tolerancia para un uso determinado”¹⁹. Las fuentes contaminantes pueden ser de origen residencial, industrial y en ocasiones de origen natural, los cauces de agua tienen la capacidad de auto purificación, Sin embargo, debido a actividades como las agropecuarias y industriales, las grandes cantidades de contaminantes derramados en los cuerpos de agua cada día superan más estas capacidades, lo que genera desgaste de este recurso forjando así un problema crítico que nos compete a todos.

La relación entre la contaminación del agua y la falta de disponibilidad de esta están estrictamente ligadas, ya que la mala utilización de este recurso natural son las importantes causas de la poca disposición del preciado líquido indispensable para la vida humana, esto se evidencia en el libro Agua Fuente de Vida donde el Doctor Miguel Auge expone que “Aproximadamente 1.000 millones de personas en la actualidad sufren la carencia de agua en el mundo. Para el 2025 UNESCO estima que dicha cantidad va a crecer hasta 3.000 millones. La escasez de agua es particularmente crítica en el Norte de China, Norte de África y Este de Asia”²⁰, cifras que son preocupantes y es necesario tomar conciencia sobre este tema.

Algunas alternativas existentes para remover compuestos orgánicos persistentes y metales en aguas residuales de la industria textil. Los temas más cercanos a la temática de este proyecto son:

- En la Universidad Tecnológica de Malaysia, Ariffin M publicó el artículo “Tratamiento de coagulación y floculación de aguas residuales en la industria textil utilizando quitosano”²¹ se llevaron a cabo experimentos en textiles aguas residuales de la industria para estudiar su efecto en el proceso de floculación utilizando quitosano. Los resultados obtenidos demostraron que el quitosano había floculado con éxito las partículas aniónicas en suspensión y reducen los niveles de demanda química de oxígeno (DQO) y turbidez en aguas contaminadas en la industria textil. Además, el quitosano mostró el mayor rendimiento en estas condiciones con 72,5% de reducción de DQO y 94,9% de reducción de turbidez.
- En la Universidad Sains de Malaysia, Latif Ahmad A. publicó el artículo “Eliminación de colorantes de aguas residuales de industria textil que utiliza tecnología de membranas”²², este artículo explora el uso de procesos de separación por membrana de micro filtración para eliminar el sólido suspendido (principalmente debido a los tintes en la manufactura de pintura

y coloración) de las aguas residuales. Los resultados muestran que el proceso de separación de membranas generó un permeado con más del 99% de color y cobre eliminado. Mientras que el 85% de la sal y el 85% del agua original eran reutilizables. La operación se realizó a una presión de 8 bar y produjo un 60% de permeado del flujo de entrada.

- En el Chemical Engineering Journal, Raju GB. publicó el artículo “Tratamiento de aguas de la industria textil sintética por electrocoagulación y electrooxidación”²³ se estudió el métodos para tratar aguas residuales de una manufactura textil que produce telas de poliéster sintético mediante técnicas electroquímicas. La muestra se sometió inicialmente a electrocoagulación para eliminar los sólidos suspendidos. Se probaron electrodos de acero dulce y aluminio como ánodos; y se encontró que el aluminio era eficaz para la remoción de sólidos suspendidos. Los sólidos suspendidos se eliminaron hasta un 99% de su concentración inicial de 830 mg L⁻¹ mediante electrocoagulación en 5 min. La DQO inicial de 1316 mg L⁻¹ se disminuyó a 494 mg L⁻¹ en presencia de electrodos de Al.
- En el Journal of Environmental Health Science and Engineering, Abid MF. público el artículo “Estudio experimental de eliminación de colorantes de aguas residuales industriales mediante tecnologías de membranas de difusión antípoda y nanofiltración”²⁴ El presente trabajo se dedicó a estudiar la viabilidad operativa utilizando estructuras de membranas de ósmosis inversa y nanofiltración como opción alternativa de tratamiento de las aguas residuales descargadas de las fábricas textiles iraquíes. La presencia de sal en la solución del tinte dio como resultado una mayor eliminación del color con una disminución del flujo de permeado. Los resultados en las condiciones operativas de concentración de tinte = 65 mg / L, temperatura de alimentación = 39 ° C y presión = 8 bar mostraron que la eliminación final del tinte con membrana RO fue del 97,2%, 99,58% y 99,9% para rojo ácido, negro reactivo y azul reactivo tintes, respectivamente. Con la membrana NF, la eliminación final del tinte fue del 93,77%, 95,67% y 97% para los tintes rojo, negro y azul, respectivamente.

Estudios previos relacionados con las nanopartículas magnéticas (MNPs) y biomasa residual.

- En la Pontificia Universidad Javeriana, Marimon Bolivar W. realizó una investigación que “se centró en el uso de nanopartículas magnéticas (MNPs) de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde en procesos de tratamiento de aguas residuales para la remoción de iones de mercurio. Las MNPs fueron sintetizadas utilizando Glutatión como agente reductor/estabilizador en una reacción clásica de coprecipitación convencionales”²⁵, estudio generando como resultado que el nano material muestra una efectividad para agitar iones de mercurio en aguas superficiales reales hasta de un 85%, generando

un impacto ambiental con una rebaja del 99.42, 76.17 y 27.14% en fila de material granulado, gasto de inflamables fósiles y toxicidad humana equitativamente.

- En la revista Journal of the Selva Andina Research Society, Chávez-Lizárraga Georgina Aurelia genero una investigación sobre los avances que puede generar el uso de la nano tecnología para diferentes áreas de estudio entre ellas los nano materiales para la desinfección de agua en donde estipula que “De acuerdo a Li et al. (2008), varios nanomateriales (naturales y fabricados) han mostrado tener fuertes propiedades antimicrobianas incluyendo: quitosano, nanopartículas de plata (NAg), nanotubos de carbono (CNT). Ya que, estos nanomateriales antimicrobianos no son fuertes oxidantes y son relativamente inertes en agua, no se espera que produzcan una desinfección dañina por sus co-productos”²⁶, indicando que generando productos con esta tecnología tiene un alto potencial para maximizar procesos de desinfección convencionales para el tratamiento de aguas.
- En el artículo “Compuestos de biomasa vegetal y nanomateriales reutilizables para la eliminación del azul de metileno del agua”²⁷, se analizó varios materiales compuestos por nanopartículas y cáscara de naranja en polvo. Se utilizo para remover colorantes sintéticos de soluciones. Utilizando Azul de metileno, en el cual se estudió las propiedades del material adsorbente. En donde se muestra que la remoción del polvo de cáscara de naranja y nanotubos de carbón activado fueron del 46%, 67% y 78%, respectivamente. La adsorción se vio muy favorecida en valores de pH básicos altos y no en valores ácidos.
- En el trabajo de investigación “Preparación y caracterización de un novedoso biosorbente magnético funcionalizado con biomasa de *Bacillus Subtilis* : Estudios cinéticos e isoterms de procesos de biosorción en la remoción de Azul de Metileno”²⁸, para este estudio se combinó la bacteria *Bacillus subtilis* con sílice magnética. Como resultados de este trabajo se determinó que la capacidad máxima de biosorción q_m logro ser de 59 mg/g a un pH de 6,8, en donde se aplicaron diferentes modelos cinéticos comparándolos entre ellos para encontrando el más adecuado al estudio.
- En la investigación de “Eliminación de colorante azul de metileno de una solución acuosa utilizando biomasa de *Agrobacterium fabrum* inmovilizada junto con nanopartículas de óxido de hierro como biosorbente”²⁹, se sintetizo nanopartículas de óxido de hierro y la cepa de *Agrobacterium fabrum*, en alginato de calcio. En este proceso se determinó que la capacidad de adsorción fue de 91 mg/g a una concentración de Azul de metileno de 200 mg L⁻¹. Demostrando que la biomasa con nanopartículas, es un biosorbente potencial para el tratamiento de efluentes industriales tóxicos.

5. MARCO DE REFERENCIA

5.1 MARCO TEÓRICO

5.1.1 Calidad del agua.

Como se evidencio anteriormente el agua potable es un recurso indispensable para la humanidad que cada día es más escaso pero que es la calidad del agua “es un término usado para describir las características químicas, físicas y biológicas del agua. La calidad del agua depende principalmente del uso que se le va a dar”³⁰. Los usos pueden variar si es para consumo debe estar en plenas condiciones como se evidencia en la siguiente imagen y para que cumpla estas condiciones deben estar regidos por las normativas del caso.

Ilustración 1. Calidad del Agua.



Fuente: lagua³¹.

5.1.2 Parámetros de calidad del agua.

La pureza del agua se establece en relación con los parámetros físicos, biológicos y químicos los cuales la clasifican en su fase natural y que trascienden fácilmente para comparar cuando se requiera desee encontrar la pureza de cierto cuerpo de agua. Para ello también se generan pruebas de laboratorio por los cuales se establece, de una forma cuantitativa la calidad de este recurso.

4.1.2.1 Parámetros físicos. Son las características que reconocen sentidos como el sabor, olor y color. Los más utilizados son color, sólidos suspendidos, turbiedad olor, sabor y temperatura.

- Sólidos suspendidos: Se les denominan a las partículas que pueden ser de naturaleza orgánica (bacterias, fibras de plantas, restos de algas, entre otros) e inorgánica (arcilla) o líquidos inmiscibles, los cuales no pueden combinarse

con otros compuestos, presentes en el agua. Algunas de las características de los sólidos suspendidos son: desagradables a la vista, proveen superficies de adsorción para agentes químicos y biológicos, pueden degradarse, causando productos secundarios perjudiciales, pueden causar enfermedades.

- Color: el agua se supone que no tiene ningún color, los lixiviados derivados de la madera, las hojas son entre otros elementos los que proveen diferentes colores al agua y los sólidos suspendidos le dan un color diferente, mientras que los sólidos disueltos suministran el color auténtico.
- Turbidez: Causa en el recurso hídrico interferencia con la incidencia de la luz, ya que afecta la fotosíntesis y esta mide el grado de luz absorbida por el material suspendido, por ende, se considera una reacción por el efecto de los sólidos en suspensión en un cuerpo de agua.
- Sabor y olor: Se relacionan ya que las fuentes pueden ser los productos finales de reacciones biológicas, y aguas residuales domésticas e industriales minerales, metales, sales.
- Temperatura: Es indispensable en la vida de las fuentes hídricas, rangos permitidos para varios factores: nutrientes, porcentaje de humedad, acidez, cantidad de y temperatura. Igualmente, esta variable afecta directamente sobre las reacciones químicas y bioquímicas que acontecen en el agua y la disolución de los gases del agua³².

4.1.2.2 Parámetros químicos. Se relacionan con el poder de liquidez del agua, por ende, es sencillo su determinación, para esto se necesita de ensayos experimentales en donde se efectúen pruebas específicas.

Los más relevantes para medir la calidad del agua son: sólidos disueltos, alcalinidad, dureza, metales.

- Sólidos disueltos: Son compuestos que subsisten en el agua después de ser filtrada, para determinarlos en el agua resultan de la acción solvente del agua, luego de operar sobre gases, líquidos y sólidos. Las consecuencias que ejercen los sólidos disueltos con relación a la pureza del agua son las propiedades tóxicas o cancerígenas.
- Alcalinidad: Es cantidad de iones presentes en el agua, los cuales reaccionan para neutralizar los iones de hidrógeno, se puede relacionar con la capacidad del agua para neutralizar los ácidos.
- Dureza: Es concentración de cationes metálicos miliequivalente en una solución, en situaciones de saturación, los cationes interactúan con los aniones presentes en el agua para formar un sólido. Estos se clasifican en carbonatada y no carbonatada.

- Metales: Son compuestos presentes en el agua que son posibles clasificar en tóxicos o no tóxicos.

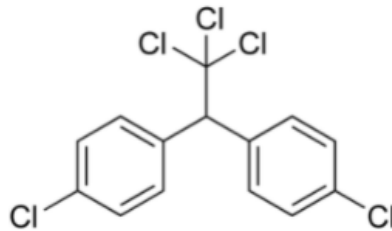
4.1.2.3 Parámetros biológicos. Los organismos vivos del agua son, indicadores de la calidad, ya sea por su presencia o ausencia de compuestos orgánicos persistentes.

Los Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP) son sustancias químicas que afectan y amenazan la salud humana y el ambiente de todo el planeta ya que:

- Persisten en el ambiente.
- Son bioacumulables.
- Pueden transportarse una larga distancia³³.

Estas características de los COP constituyen una mezcla peligrosa que hace difícil controlarlos una vez expuestos en el medio ambiente³⁴.

Ilustración 2. Estructura química de compuestos orgánicos persistentes.



Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (España)³⁴.

5.1.3 Contaminación del agua.

El agua al ser un recurso tan versátil presenta varias utilidades tales como residenciales, comerciales e industriales, pero así mismo es la más afectada en términos de cargas contaminantes generando así problemas de salud, la definición textual es que “la contaminación del agua se produce por el vertimiento en ella de un elemento o compuesto, orgánico o inorgánico, disuelto, disperso o suspendido, alcance una concentración que exceda la tolerancia para un uso determinado”³¹⁹. Las fuentes contaminantes pueden ser de origen casero, industrial y a veces de forma natural, los cauces de agua tienen la capacidad de auto purificación. No obstante, por la creciente de la población, y de las actividades industriales y agropecuarias, el vertimiento de cargas contaminantes a las fuentes hídricas cada vez supera más estas capacidades, con el consecuente deterioro de este recurso generando así un problema crítico mundial que nos compete a todos como se evidencia en esta simple animación.

Ilustración 3. Contaminación del agua.



Fuente: Infoeducacion.es³⁵.

La (UNESCO) en su programa mundial de evaluación de los recursos hídricos (WWAP) en 2009 manifiesto que “más del 80% de las aguas residuales en los países en vías de desarrollo se descarga sin tratamiento, contaminando ríos, lagos y zonas costeras”³⁶, investigación realizada hace once años y tomando en cuenta el crecimiento poblacional mundial hoy en día debe ser mucho más alto ese porcentaje datos que nos aportan suficientes razones para crear nuevos métodos para tener más control sobre las aguas residuales.

5.1.4 Tipos de contaminantes.

Con el desarrollo de la humanidad se logró clasificar los contaminantes en cuerpos hídricos, “Existen diferentes tipos de contaminantes de las aguas residuales en función de la calidad se clasifican en físicos, químicos y biológicos”³⁷.

Las propiedades químicas se dividen dependiendo de su origen los contaminantes orgánicos dan como resultado la disminución del oxígeno como resultado de la degradación biológica de los compuestos que producen ácidos grasos, carbohidratos y aminoácidos por lo que su presencia se evalúa mediante parámetros expresados en términos del oxígeno: (DQO), (DBO) y (COT).

Los contaminantes inorgánicos son el resultado de metales tóxicos, material articulado como sedimentos; y de seres vivos como bacterias y protozoos.

La profanación humana o antropogénica es producto de las actividades humanas todo tipo de actividades comerciales que generan fenoles, cianuros, cromo y detergentes todas estas sustancias ocasionan daños a la salud.

Ilustración 4. Tipos de contaminantes.



Fuente: Educación ambiental³⁸.

5.1.5 Utilización del agua en las industrias.

El sector industrial es responsable de una gran parte del gasto de agua pura, alcanzando hasta el 20% de los recursos disponibles y, al mismo tiempo, es una de las principales causas de su continua degradación³⁹. Esto ocurre debido al rápido crecimiento en la población, lo que conduce a la obligación cada vez mayor de agrandar la elaboración de bienes de consumo, es especial la industria textil ya que es indispensable para la proyección de las sociedades, esta industria tiene un consumo de agua extremadamente elevado en todos sus procesos de producción entre estos el desencolado, limpieza, decoloración, impresión y acabado, todos los procesos generan que los efluentes textiles contengan una alta gama de contaminantes que afectan en gran medida los cuerpos de aguas⁴⁰.

Los contaminantes que se pueden encontrar en los efluentes de los textiles incluyen lo siguiente:

- Compuestos orgánicos o inorgánicos como metales, los tintes son los más comunes de encontrar como se evidencia en la ilustración 4 debido a sus procesos de producción, fenoles, pesticidas, fosfatos y surfactantes.
- Concentraciones dominantes de sólidos suspendidos totales (SST)
- Elevadas cantidades de sólidos disueltos totales (TDS).
- Los tintes se pueden considerar entre los contaminantes que generan más daño.

Ilustración 5. Contaminación de tintes por procesos textiles.



Fuente: Central cero⁴¹.

Todos los contaminantes presentes en estas aguas residuales dan una alerta y generan retos para encontrar métodos eficientes para el tratamiento correcto de estas aguas.

5.1.6 Tratamiento de aguas residuales.

Las aguas residuales radican de dos compuestos, un flujo líquido y unas materias sólidas que son los lodos. Las razones para el tratamiento de estas aguas son impedir la alteración física, química, biológica y en algunos casos radioactiva en las fuentes de agua⁴², estas razones resumidas en cuatro ítems en general son las siguientes:

Razones higiénicas o de salud pública, económicas, estéticas y legales.

Ilustración 6. Problema de las aguas residuales.



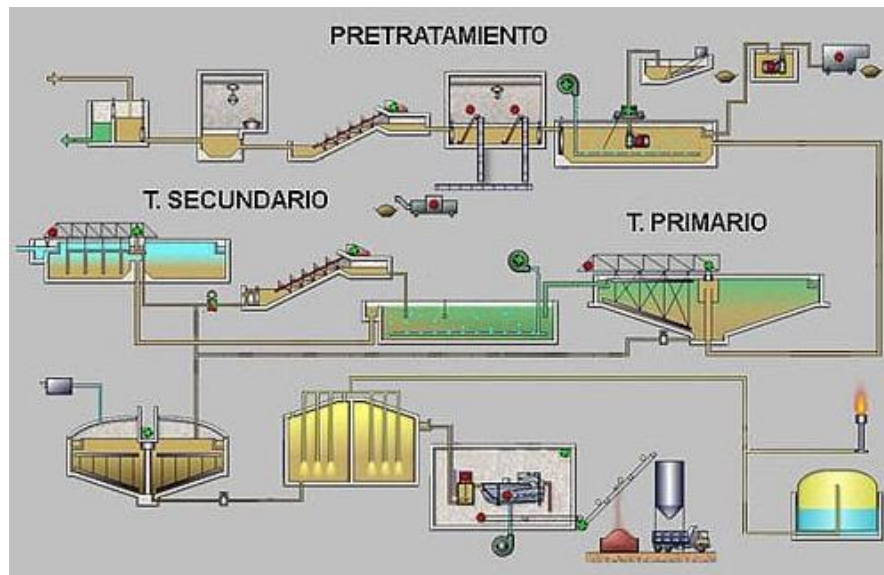
Fuente: Banco mundial b⁴³.

Como se evidencia en la ilustración 4 el 80% de las aguas residuales del mundo son vertidas al medio ambiente sin un tratamiento adecuado. Generalmente existen dos maneras genéricas para el tratamiento de las aguas contaminadas.

- La primera de ellas se basa principalmente en dejar que las aguas residuales se afirmen en el fondo de los tanques, facilitando que el material se deposite. Luego se trata el flujo superior de residuos con otros elementos para minimizar la cantidad de agentes contaminantes presentes en el recurso hídrico a tratar.
- El segundo más utilizado consiste en utilizar las bacterias para afectar la materia orgánica presente en los cuerpos de agua. Este proceso tiene como nombre conocido “tratamiento de lodos activados”, el que necesita dotación de oxígeno a las bacterias de las aguas a tratar para efectuar su metabolismo, este proceso presenta los siguientes pasos:

1. Pretratamiento: eliminación material particulado de gran tamaño.
2. Deposición primaria: por medio de la gravedad de las partículas con gran masa y contaminantes adjuntos se sedimentan al fondo de los tanques de tratamiento.
3. Tratamiento secundario: alimentación biológica por medio de los lodos activados que fomentan el crecimiento de microorganismos para así aumentar el retiro de los contaminantes.
4. Tratamiento terciario: tratamiento químico entre los principales esta la precipitación y desinfección, igualmente puede utilizarse para realizar los pasos del tratamiento primario⁴⁴.

Ilustración 7. Tratamiento de aguas contaminadas.



Fuente: Tratamiento de aguas residuales⁴⁵.

5.1.7 Tratamientos de aguas residuales industriales.

Este proceso radica en varios métodos biológicos, físicos y químicos que por medio de efectuar interacción con los efluentes se tiene que certificar la recuperación o eliminación del contaminante orgánico a un grado solicitado por las leyes que normalizan el vertimiento del efluente o que permitan garantizar los ambientes mínimos aceptables del proceso para la reutilización del caudal para uso doméstico. El nivel permitido de contaminante puede regularse por medio del uso de varias técnicas destructivas como no destructivas.

Los métodos de eliminación de contaminantes orgánicos son:

- Métodos no destructivos:

Adsorción (carbón activo y otros adsorbentes).

Desorción (Scripting).

Extracción en fase líquida con disolventes Tecnología de membranas (Ultrafiltración, nanofiltración).

- Métodos destructivos:

Tratamiento biológico (aerobio y anaerobio).

Oxidación química Oxidación húmeda catalítica y no catalítica.

Oxidación húmeda supercrítica.

Procesos avanzados de oxidación.

En el contexto del tratamiento de contaminantes en aguas residuales industriales, se entiende como una etapa previa de concentración antes de abordar su destrucción química⁴⁶.

5.1.8 Adsorción.

Adsorción es un proceso de separación y concentración de uno o más componentes de un sistema sobre una superficie líquida o sólida. Este fenómeno tiene lugar cuando se coloca dicha superficie en contacto con una disolución. Una capa de moléculas de soluto se acumula en la superficie del sólido debido al desequilibrio de las fuerzas superficiales⁴⁶.

El sólido (por ejemplo, carbón activo) se denomina adsorbente y el soluto a adsorber se denomina adsorbato. La adsorción sobre sólidos puede clasificarse como adsorción física (fisisorción) o química (quimisorción)⁴⁷.

La línea de división entre ambas no siempre está clara.

A. Según la fortaleza del enlace.

- Física: Las moléculas se mantienen unidas a la superficie del sólido por medio de fuerzas intermoleculares de Van de Waals relativamente débiles. Se produce cuando las fuerzas atractivas intermoleculares entre un sólido y un gas son mayores que las existentes entre moléculas del gas.
- Química: Se produce una reacción química en la superficie del sólido, y el gas se mantiene unido a la misma a través de enlaces químicos relativamente fuertes.

B. Según el calor de adsorción.

- Física: Tienen calores de adsorción pequeños, de 1 a 10 kcal/mol (exotérmica), valores que son semejantes a los de condensación.
- Química: Presenta grandes calores de adsorción como en las reacciones químicas, del orden de 10 a 200 kcal/mol. Debido a este elevado calor de adsorción, la energía asociada con las moléculas químicamente es diferente de la asociada con las moléculas presentes en la corriente de gas.

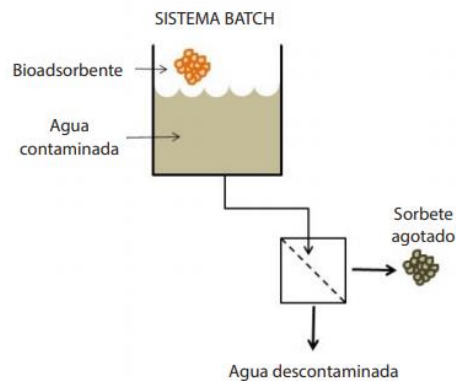
C. Según la influencia de la temperatura.

- Física: Solo se produce, de forma apreciable, a temperaturas inferiores o próximas al punto de ebullición del gas.
- Química: Se produce a altas temperaturas.

D. Según la influencia de la presión.

- Física: Un aumento de la presión produce un aumento de la cantidad adsorbida.
- Química: Un aumento de la presión disminuye la cantidad adsorbida ⁴⁸

Ilustración 8. Proceso de adsorción.



Fuente: Universidad de Medellín⁴⁸.

5.1.9 Adsorbentes no convencionales.

Diversos estudios demuestran la posibilidad de desarrollar materiales con adecuadas capacidades de adsorción a partir fuentes naturales, despertando el interés para explorar estos materiales alternativos considerados “no-convencionales”, que permitan reducir o eliminar los contaminantes de naturaleza metálica u orgánica, contenidos en aguas residuales. Los adsorbentes no-convencionales (verdes o bioadsorbentes) surgen del aprovechamiento de los materiales de desecho que provienen de la industria alimentaria y agrícola; estos son desechos de fruta, residuos vegetales y plantas⁴⁸.

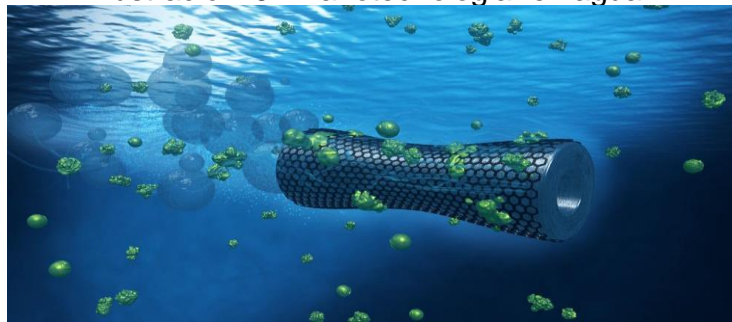
A continuación, se muestra una sencilla clasificación, considerando el origen o fuente de obtención de los adsorbentes no convencionales empleados en los métodos de tratamiento de aguas residuales contaminadas.

- a. Biomasa viva y no viva (microorganismos).
- b. Materiales de desecho agroindustriales.
- c. Materiales de desecho de industria alimentaria.

5.1.10 Uso de nanotecnología en el agua residual.

Los avances en la ciencia y la ingeniería a nano escala sugieren que muchos de los problemas actuales relacionados con la calidad del agua podrían resolverse o mejorarse en gran medida utilizando nano absorbentes, nanocatalizadores, nanopartículas bioactivas, membranas catalíticas nanoestructuradas y filtración mejorada de nanopartículas, entre otros productos y procesos resultantes del desarrollo de la nanotecnología. Las innovaciones en el desarrollo de nuevas tecnologías para desalinizar el agua se encuentran entre las más emocionantes y prometedoras. Además, los productos derivados de la nanotecnología que reducen las concentraciones de compuestos tóxicos a niveles inferiores a ppb pueden ayudar a lograr los estándares de calidad del agua y las advertencias sanitarias⁴⁹.

Ilustración 9. Nanotecnología en agua.



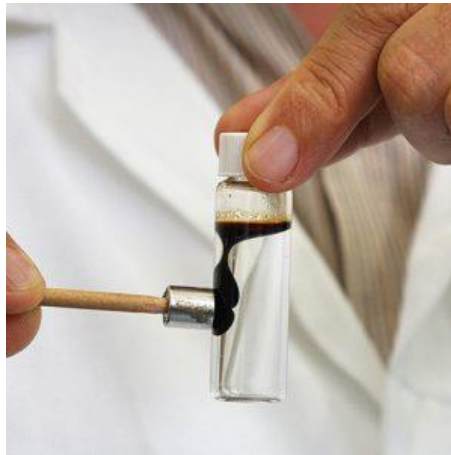
Fuente: La vanguardia⁵⁰.

5.1.11 Nanopartículas magnéticas.

Las nanoestructuras son en su mayoría cristalinas, lo que significa que sus miles de átomos presentan un ordenamiento regular en el espacio, en lo que se denomina red cristalina⁵¹. En el caso de la biodistribución de las nanopartículas, esta depende en gran medida de la ruta de síntesis, tamaño y forma. Las partículas magnéticas de tamaño nanométrico (diámetros menores de 100 nm) pueden ser preparadas mediante diversos procedimientos. Normalmente estas partículas son obtenidas usando métodos de precipitación, donde la principal dificultad radica en tener nanopartículas monodispersas⁵².

Los estudios realizados con nanopartículas magnéticas demostraron la importancia en el tratamiento de aguas y aguas residuales. En particular, las nanopartículas de ferrita (SFNC) utilizados para el tratamiento de aguas y aguas residuales son muy estable, fácilmente regenerable y reutilizable durante varios ciclos sin perder sus propiedades; lo que conduce a una reducción del costo del tratamiento. En esta revisión, los avances recientes y el potencial aplicaciones de nanocompuestos de ferrita de espinela (SFNP) / nanopartículas de ferrita (SFNC) para la eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos mediante las rutas de adsorción se revisan críticamente. Además, la aplicación de nanocompuestos de ferrita de espinela (SFNP) para extracción de diversos contaminantes presentes en el agua para la determinación cuantitativa a niveles de trazas en agua y aguas residuales se revisan a fondo⁵³.

Ilustración 10. Nano partículas magnéticas.



Fuente: Informática aplicada⁵⁴.

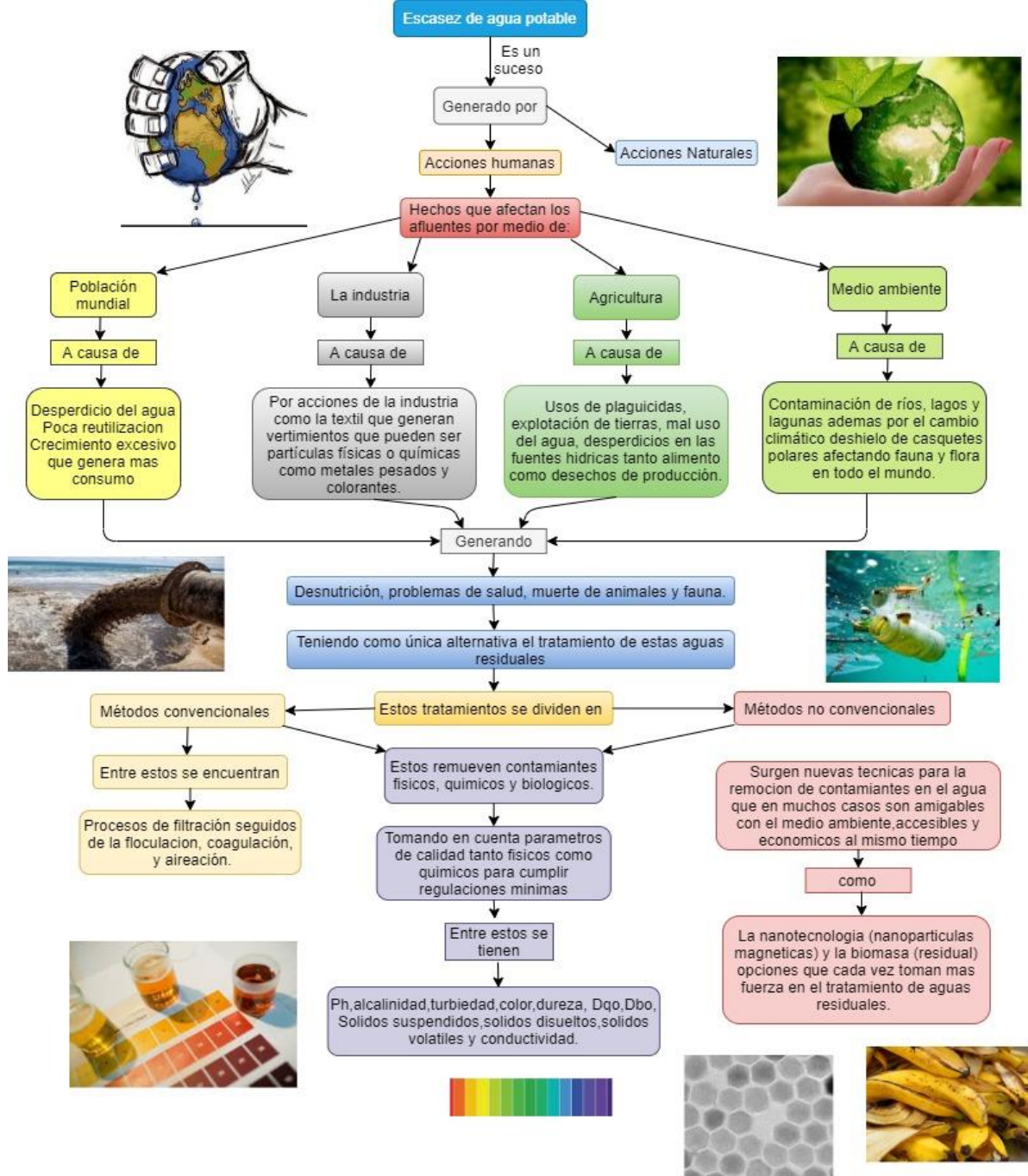
5.1.12 Biomasa residual.

La biomasa se refiere a “todo material de origen biológico, excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de

mineralización”⁵⁵. La biomasa también se refiere principalmente a la energía solar convertida por la vegetación en más vegetación o materia orgánica y posteriormente dicha materia orgánica puede ser convertida en diferentes tipos de energía, acorde al uso que se le quiera dar. En el contexto energético, el término biomasa se emplea para denominar a una fuente de energía renovable basada en la utilización de la materia orgánica formada por vía biológica o de los productos derivados de ésta⁵⁶. La biomasa es una energía renovable, ya que su contenido energético es el resultado de la fotosíntesis, nombre dado al proceso de conversión de la energía lumínica del sol en energía química (ATP) utilizada posteriormente para la transformación del dióxido de carbono (CO_2) y el agua (H_2O) en carbohidratos y oxígeno (O_2)⁵⁷.

6. MARCO CONCEPTUAL

Ilustración 11 Marco Conceptual.



Fuente: Autores

7. MARCO LEGAL

A lo largo de los años a nivel mundial y en Colombia han surgido gran cantidad de normativas que rigen los tratamientos de aguas residuales y todo lo relacionado con el saneamiento básico a continuación se presenta una compilación de estas normas:

- Resolución 64-292 2010 Asamblea General de las Naciones Unidas: Declara el acceso seguro a un agua potable salubre y al saneamiento como un derecho humano fundamental para el completo disfrute de la vida y de todos los demás derechos humanos; de esta forma el presente proyecto busca mejorar la calidad del agua residual proveniente de la industria textil al momento de ser vertidas a corrientes de agua.
- Constitución política de Colombia Art 49 1991 República de Colombia: Establece que el saneamiento ambiental es un servicio público a cargo del Estado, que por medio de nuevas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales se puede garantizar este saneamiento.
- Constitución política de Colombia Art 50 1991 República de Colombia: Establecen como obligación del Estado, proteger la diversidad e integridad del ambiente; fomentar la educación ambiental; a través del presente estudio es válido afirmar que aporta a la prevención del deterioro ambiental, ayudando a reducir los contaminantes producidos que generan este detrimento.
- Decreto 1076 2015 Presidencia de la República de Colombia: Promueve el Reúso de las Aguas Residuales a través de los Planes de Reconversión a Tecnologías Limpias en Gestión de Vertimientos – PRTLGV y lo incluye en la gradualidad para el cumplimiento de la norma de vertimientos. Los materiales usados en el estudio de este documento, ofrecen una alternativa como tecnología para reducir los contaminantes en los vertimientos de las aguas textiles.
- Resolución 1207 2014 Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible:

Establece las disposiciones relacionadas con el uso del agua residual tratada y no aplica para su empleo como fertilizante o acondicionador de suelos. Las aguas residuales tratadas se podrán utilizar en los usos industriales, ya que mediante el tratamiento propuesto permite eliminar ciertos contaminantes y metales pesados que pueden afectar los suelos productivos.
- Ley Agua Limpia CWA 1977 U.S Environmental Protection Agency: Establece límites del nivel contaminante en los abastecimientos de agua del

país; expedir normas para la industria, así como autorizar poderes para vigilar el cumplimiento de estas normas. Este tipo de proyectos investigativos son aplicables a nivel internacional por este tipo de leyes, ya que al generar nuevas tecnologías de remoción se puede dar cumplimiento a este tipo de normativas.

- Decreto 1076 2015 Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: plantea planes de implementación a tecnologías limpias en gestión de vertimientos, el cual se relaciona directamente con el presente estudio.
- Resolución 0631 de 2015 Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: Establece los parámetros y valores límites máximos permisibles que deberán cumplir quienes realizan vertimientos puntuales a los cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. Esta resolución rige los vertimientos de “fabricación y manufactura de bienes” en donde no se reporta un límite en específico con referencia a “sustancias activas al azul de metileno y mercurio”

8. ANTECEDENTES

El grupo de investigación y semillero de nanotecnología se viene trabajando el tema los siguientes temas

- El trabajo de investigación que busca un método de filtración con nanomateriales para la perfeccionamiento de los parámetros de calidad del agua⁵⁸ se evidencia un reducción de los cuantificaciones físico-químicos que determina la pureza del agua confrontando los resultados conseguidos en la filtración por medio de carbón activado estándar y sintetizado con nanopartículas magnéticas tuvo una reducción entre el rango de 65% al 90% en los parámetros de turbiedad, color y solidos totales, de igual manera los valores del índice de calidad del agua para cada muestra se encuentran en un valor 0,865 lo cual significa que las muestras de agua después de la filtración son aceptables.
- La investigación “Remoción de azul de metileno de cuerpos de agua utilizando nanopartículas magnéticas Fe_3O_4 ”⁵⁹ se genera una propuesta de tratamiento al agua afectada justo antes del vertido saliendo de la fábrica. Pues se trabaja con agua que esté paralizada y el azul de metilo se elimina, los resultados evidenciaron una aceptable y total eliminación del azul de metileno luego de emplear el carbón activado modificado con las nanopartículas.
- En el desarrollo de este trabajo “Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde”⁶⁰ se generó un método de síntesis verde por medio del uso de extractos de vegetaciones orientados a la mejora de las características magnéticas de las nanopartículas sintetizadas, de la misma forma encontró cuál es la influencia presenta el tamaño de la nanopartícula en las propiedades magnéticas respecto a la potencia de magnetización y energía independiente. Se estableció que debe emplear una temperatura de reacción de 90° C y con un tiempo de reacción de 120 minutos debido a que con estos dos parámetros se obtuvo el mayor diámetro de partícula y saturación de magnetización, que corresponden a 53 nm y 66.66 emu/g respectivamente. Así mismo se evidencio que existe una relación directamente proporcional entre el diámetro de la partícula con respecto a la energía libre y la fuerza de magnetización, ya que, al aumentar este diámetro, aumentan estos valores.

9. ALCANCE Y LIMITACIONES

9.1 ALCANCE

El presente proyecto busca caracterizar la composición del agua residual proveniente de la industria textil, sintetizar un material compuesto por nanopartículas magnéticas y biomasa residual de cascara de plátano, llevar a cabo ensayos de adsorción Batch y continuo para remoción de Azul de metileno y mercurio.

9.2 LIMITACIONES

Para el desarrollo del presente proyecto investigativo, se presentaron diferentes limitaciones:

- Tiempo reducido y susceptible a los inconvenientes que vivió el país y la pandemia a causa del COVID-19 para el desarrollo de los laboratorios. Dando así, un desarrollo no óptimo para realizar todas las mediciones y ensayos Batch y continuo necesarias, reduciendo las herramientas para completar un análisis más exhaustivo.

Para dar solución a esta restricción se optó por la utilización del software FAST2.1 Beta, el cual permitió realizar una simulación de los ensayos continuos y en los laboratorios que se realizaron se trabajó en paralelo diferentes ensayos, optimizando así los tiempos para la entrega del documento final.

- El laboratorio de la Universidad Católica de Colombia no cuenta con los suficientes equipos para realizar una adecuada caracterización del nanomaterial que se utilizó.

La solución que se encontró fue por medio del asesor (Wilfredo Marimon) y sus conexiones en la Universidad Javeriana donde si se cuenta con los equipos necesarios para determinar las propiedades magnéticas, Cristalografía (rayos XRD) y Espectro infrarrojo (FTIR).

10. METODOLOGÍA

La metodología utilizada para la ejecución y puesta en marcha del proyecto, es una metodología experimental que consiste en trabajos en el laboratorio, la cual es una actividad compleja y refinada que vale la pena considerar como lo expone Carlos Gutiérrez, en su libro *Introducción a la Metodología Experimental*, en esta época el ingeniero tenía la responsabilidad de resolver numerosos problemas y determinar la mejor solución se deben cuantificar las variables contenidas en el problema⁶¹ en este caso el tratamiento de aguas residuales textiles en donde se relacionan las siguientes variables dependientes e independientes:

Tabla 1. Variables Dependientes e Independientes.

<i>VARIABLES</i>	<i>PARÁMETROS</i>
Dependientes	<ul style="list-style-type: none">· pH· Color· Alcalinidad· Solidos disueltos Totales (TDS)· Turbiedad· Dureza Ca· Dureza Mg· Conductividad· Concentración Azul de Metileno.· Concentración de Mercurio.
Independiente	<ul style="list-style-type: none">· Cantidad de Biomasa.· Cantidad de Nanopartículas magnéticas.· Temperatura.






Fuente: Autores

10.1 PREPARACIÓN DE AGUA RESIDUAL TEXTIL SINTÉTICA

Las aguas residuales textiles están compuestas por diferentes contaminantes del proceso de producción, se caracteriza por ser muy variable en caudal y tiene una amplia diversidad de productos provenientes de la eliminación en cada proceso. Con el fin de reproducir en laboratorio las características de un efluente textil representativo se simulará el efluente de la industria⁶².

Se pesó en recipientes de 40 mL Ftalato 0.5 g, Urea 0.5 g, ZnCl₂ 0.04 g y MgSO₄ 0,017 g, los cuales se adicionaron en 30 mL de agua destilada y se colocaron en el sonicador durante 5 minutos, para asegurar su disolución; posteriormente se pesó 0.01 g de azul de metileno, se disolvió en 10 mL de agua destilada.

Ilustración 12. Compuestos persistentes.

				
Azul de metileno	Urea	Cloruro de Zinc	Ftalato	Sulfato de Magnesio

Fuente: Autores

Se adiciono en un balón aforado de 500 mL cada una de las soluciones y 1 mL de la solución de azul de metileno, se llenó hasta los 500 mL con agua destilada.

Ilustración 13. Agua residual sintética.



Fuente: Autores.

Tabla 2. Muestra sintética de estudio.

Producto	Fórmula	Concentración (g/L)
Ftalato	$C_6H_4(COOC_8H_{17})_2$	16,67
Urea	CH_4N_2O	16.67
Cloruro de zinc	$ZnCl_2$	1.33
Sulfato de magnesio	$MgSO_4$	0.57
Azul de metileno	$C_{16}H_{18}ClN_3S$	0.002

Fuente: Autores

Se producirán 4,2 L de agua residual textil sintética. Esta muestra se considera compuesta y se utilizarán para el estudio de caracterización.

10.2 CARACTERIZACIÓN DE AGUA RESIDUAL TEXTIL

Los parámetros fisicoquímicos se analizan según el método descrito en Métodos estándar para el análisis de las aguas residuales industriales.

Tabla 3. Métodos de medición.

Parámetros	Unidad	Código
pH	Unidades de pH	SM 4500 HB
Temperatura	°C	SM 2550 B
Conductividad	$\mu S/cm$	SM 25510 B
Turbiedad	NTU	SM 2130 B
Alcalinidad	mg/L	SM 2320 B
Solidos disueltos totales	mg/L	SM 2540 D, E
Dureza Ca	mg/L	SM 3500 - Ca D
Dureza Mg	mg/L	SM 2340 C
Color	PtCo	SM 2120 B

Fuente: Autores

El pH, conductividad, temperatura y solidos disueltos totales se determinará mediante el medidor multiparamétrico y la turbiedad mediante el turbidímetro, para el análisis de las durezas y el color mediante el espectrofotómetro.

La alcalinidad se encontró mediante la titulación de Fenolftaleína y Naranja de metilo por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{Alcalinidad Fenolftaleina} = \frac{F * N * 50000}{V}$$

$$\text{Alcalinidad Total} = \frac{T * N * 50000}{V}$$

Donde:

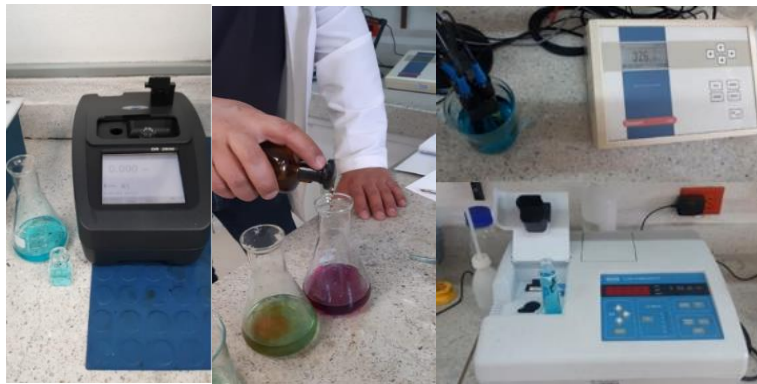
F: Volumen de ácido normalizado gastado (mL) usando como indicador Fenolftaleína.

T: Volumen de ácido normalizado gastado (mL) (Fenolftaleína + Naranja de metilo).

N: Normalidad del ácido (N).

V: Volumen de la muestra (ml).

Ilustración 14. Espectrofotómetro, multiparámetro, turbidímetro y ensayo de alcalinidad.



Fuente: Autores

10.3 PREPARACIÓN DE BIOMASA RESIDUAL DE CASCARA DE PLÁTANO

La biomasa se lavó con agua destilada para eliminar el exceso de impurezas. Se sometió a exposición solar durante dos días (48 horas). La cáscara de plátano cortada en pequeños pedazos con tijeras, luego se dejó en el horno por 12 horas y se molió en un mortero de porcelana. La cáscara de plátano fue sometida a un segundo lavado con abundante agua destilada para eliminar la pigmentación natural de la cáscara; por último, la biomasa nuevamente fue secada en un horno durante 24 horas a 90° C.

Ilustración 15. Lavado, macerado y secado de biomasa.

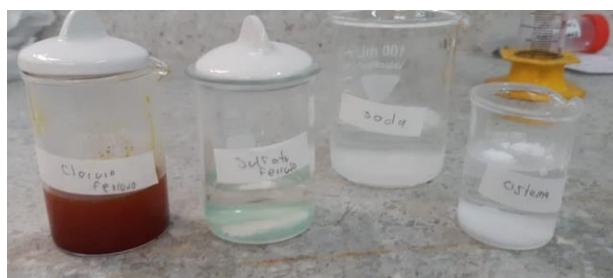


Fuente: Autores

10.4 MATERIALES SÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS (MNP_s)

Los reactivos químicos para sintetizar las nanopartículas serán adquiridos comercialmente. Cloruro férrico (III) hexahidratado (FeCl_3), Sulfato ferroso (II) (FeSO_4), Hidróxido de sodio (NaOH) y L-Cisteína ($\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}_2\text{S}$) reducido ($\text{C}_{10}\text{H}_{17}\text{N}_3\text{O}_6\text{S}$)⁶³.

Ilustración 16. Materiales de síntesis de nanopartículas.



Fuente: Autores

10.5 PREPARACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE MAGNÉTICAS (MNP_s)

Las MNP_s se sintetizaron mediante el método de coprecipitación a partir de una solución acuosa de Cloruro férrico y Sulfato ferroso. Se adiciono en 4 beakers pequeños previamente lavados 3.6 g de Cloruro férrico, 1.3 g de Sulfato ferroso, 6.0 g de Soda caustica y 1.0 g de Cisteína, agregando en cada uno 20 mL de agua destilada y en la Soda caustica 40 mL; se coloca las soluciones en el sonicador 5 min esperando que disuelva el correctamente.

En un balón volumétrico de 250 mL se adicionó 50 mL de agua destilada y se colocó en la chaqueta de calentamiento, mientras las soluciones están en el sonicador para ir calentando el agua destilada, posteriormente se adiciona las soluciones de Cloruro férrico y Sulfato ferroso en el balón volumétrico.

Ilustración 17. Preparación de nanopartículas magnéticas.



Fuente: Autores

10.6 PREPARACIÓN Y SÍNTESIS DE BIOMASA DE CÁSCARA DE PLÁTANO CON NANOPARTÍCULAS DE MAGNÉTICAS (MNP_s)

Se calienta la mezcla en la chaqueta de calentamiento a 120 rpm hasta llegar a los 70°C, en este punto se agrega 20 mL de Soda caustica, observándose una coloración oscura con tirillas de pH, manteniendo la agitación. Cada 5 min ir agregando 3 mL de Soda caustica hasta llegar a 80°C y se deja la mezcla durante una 1 h en la chaqueta de calentamiento; pasado 15 min se adicionó la Cisteína y después de media hora se adicionó la casara de plátano.

Ilustración 18. Coloración oscura y agitación.



Fuente: Autores

Finalmente, después de la hora, se retiró el balón volumétrico y se colocó un imán debajo, para atraer las partículas a la parte inferior, se retiró el agua sobrante, y se lavó las partículas 2 veces con agua destilada, dejándolas secar en el horno a 40°C por 12 horas.

Ilustración 19. Secado de *BiomasaResidual@MNPs*.



Fuente: Autores.

10.7 CARACTERIZACIÓN DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS (*MNPs*)

La morfología de las partículas se determinó mediante la curva de saturación magnética mediante microscopía electrónica de barrido. El recubrimiento orgánico adsorbido a la superficie de la partícula se determina mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier, cristalografía FTIR y propiedades magnéticas. Las propiedades magnéticas de las *MNPs* se estudiarán mediante mediciones de magnetómetro de muestra vibrante. El tamaño hidrodinámico de las nanopartículas magnéticas sintetizadas se determinará mediante dispersión dinámica de luz⁶³.

10.8 REALIZACIÓN DE ENSAYOS BATCH Y CONTINUO PARA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES

10.8.1 Ensayo Batch.

Se realizará el ensayo Batch para estudiar la capacidad de adsorción de iones metálicos en las nanopartículas (modificadas con biomasa residual y sin modificar), éstas se adicionarán a 20°C a soluciones acuosas de Azul de metileno y mercurio, preparadas con diferentes valores de pH ajustados con soluciones de (0.1 M) de NaOH o HCl, a una concentración de nanopartículas de cascara de plátano modificada 5 g/L una velocidad de agitación entre 110 y 130 rpm por un tiempo estándar de 1 h. La capacidad de adsorción se calcula sobre la diferencia de concentraciones al inicio y final del proceso:

En este ensayo se analizará un volumen de 4,2 L de agua a tratar.

La capacidad de adsorción se calcula sobre la diferencia de concentraciones al inicio y final del proceso:

$$q_e = (C_i - C_f) * \frac{V}{m}$$

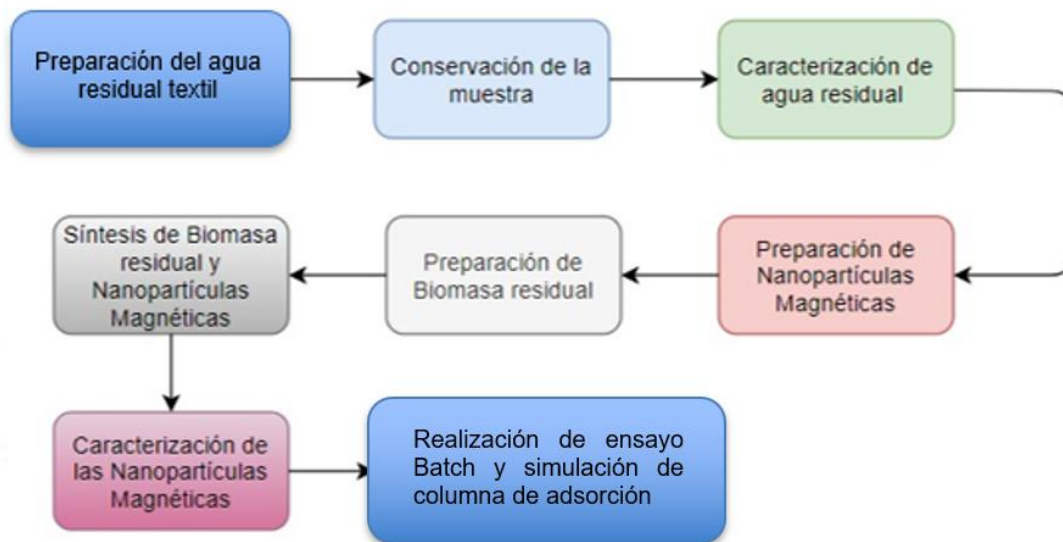
Donde q_e es el equilibrio de adsorción de la capacidad (mg/g), C_i y C_f son las concentraciones iniciales y el equilibrio (mg/l) del ion en la solución, V es el volumen (L) de solución tomada y m es la masa (g) de adsorbente usado.

10.8.2 Ensayo continuo columna de adsorción.

Basados en los ensayos Batch se estableció los modelos isotérmicos de adsorción para contacto de nanomaterial con agua sintética contaminada con Azul de metileno, esto permitió realizar la simulación de una columna de adsorción en software FAST 2.1 beta de sus siglas en ingles Fixed-bed Adsorption Simulation Tool, en esta herramienta se pudo predecir los comportamientos de las curvas de avance que puede generar un filtro de adsorción de lecho fijo empleado para el tratamiento de aguas contaminadas⁶⁴.

Los estudios de simulación de adsorción de la columna que evaluó la eliminación de Azul de metileno y mercurio con las nanopartículas magnéticas modificadas obtenidas se colocaron con diferentes cantidades de nanomaterial, de tal forma que se evaluó diferentes alturas de relleno para el tratamiento. Se vario la cantidad de material adsorbente y agua sintética entre los caudales que permite la bomba peristáltica de tamaño pequeño, con un caudal máximo de 1.6 L/s⁶⁵, simulando el relave minero de la columna, con concentración de Azul de metileno de 2 -10 mg/L en la parte superior de la columna fluyendo de arriba abajo.

Ilustración 20. Metodología



Fuente: Autores

11 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el objetivo de conocer el comportamiento del grupo de compuestos orgánicos persistentes, siendo el más representativo y centro de estudio el colorante Azul de metileno y de mercurio como metal pesado más común en los procesos de la industria textil, los cuales se busca remover mediante biomasa residual sintetizado con nanopartículas magnéticas de los cuerpos de agua contaminados. Donde se analizaron las siguientes características de los materiales a utilizar.

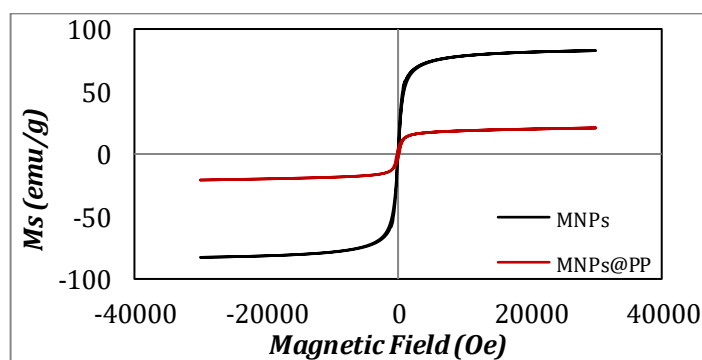
11.1 CARACTERIZACIÓN DE NANOMATERIAL

11.1.1 Propiedades magnéticas.

La curva de saturación magnética de las BiomasaResidual@MNP_s y de las nanopartículas se evidencia en la gráfica 1, donde la magnetización de la saturación (M_s) de las nanopartículas con la biomasa muestran una disminución en sus propiedades magnéticas, presentando un valor máximo de 20.85 emu/g comparado con el estado original de las nanopartículas de 82.68 emu/g, teniendo en cuenta que el valor teórico de las nanopartículas de la magnetización de la saturación es de 90 emu/g⁶⁶, este fenómeno se puede dar ya que no se conoce los compuestos orgánicos que hacen parte de la estructura de la biomasa, realizando una reducción del hierro presente en la síntesis al contacto con el agua.

Analizando la Gráfica 1 del material estudiado se puede deducir que no presenta bucles de histéresis magnéticos; ya que su remanencia y coercitividad se evidencia cercano a cero, esto hace que el material en estudio presente un comportamiento superparamagnético⁶⁷, lo que quiere decir que cuando tenga un campo magnético cercano, su capacidad magnética no incrementa, esto se produce a temperatura ambiente.

Gráfica 1. Magnetización a temperatura (26.85° C) ambiente de MNP_s obtenidas.



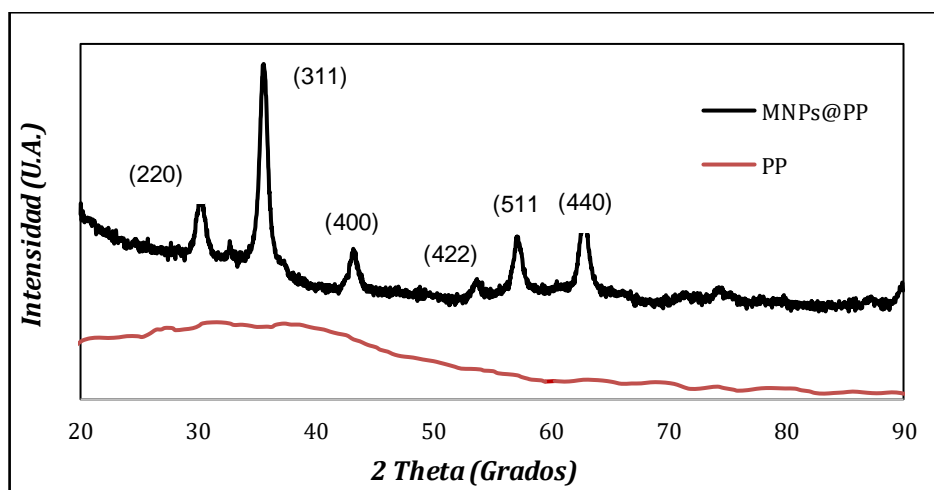
Fuente: Autores

11.1.2 Cristalografía (XRD).

El análisis (XRD) o difracción de rayos X, es la única técnica de laboratorio que permite determinar la estructura cristalográfica de materiales particulados⁶⁸, para el material de estudio, se realizó la radiación con $\text{CrK}\alpha$ y Cu (1.5406 \AA), con un intervalo de ángulos entre 20 y 90 grados, presentando una velocidad de escaneo de $0.04^\circ/\text{s}$ y un ancho de paso de 0.02. La gráfica, muestran los difragtogramas de *nanopartículas* sintetizadas con biomasa residual, mostrando picos de intensidad U.A. con valores de (220), (311), (400), (422), (511) y (440), valores determinados teóricamente de la magnetita, ya que están dentro del mismo rango de ángulos. Estos datos se pueden asociar a directamente a una estructura cubica espinela, la cual corresponde a la estructura de la magnetita⁶⁹. Los picos de XRD fueron registrados usando datos de El Centro Internacional de Datos de Difracción (ICDD) el cual mantiene una base de datos de patrones de difracción data base.

En la Gráfica 2, la serie de datos roja (biomasa residual) no presenta picos, lo que asegura que es una estructura no cristalina, propio de materiales orgánicos.

Gráfica 2. Patrón de difracción de Rayos X.



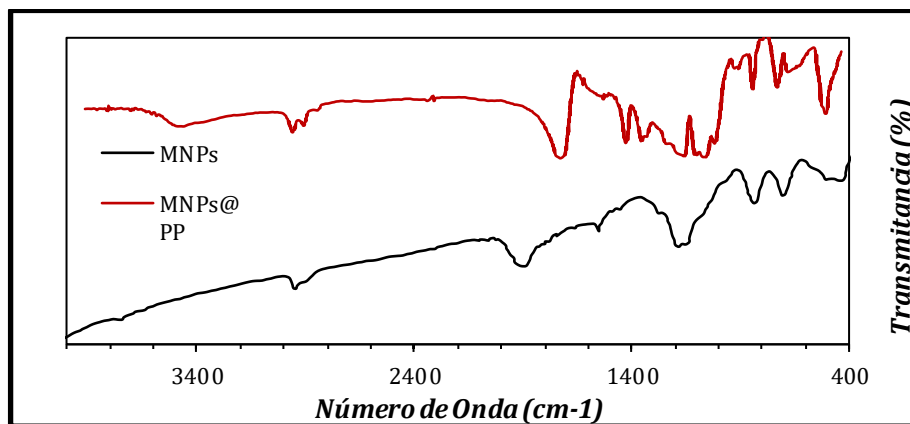
Fuente: Autores

11.1.3 Espectro infrarrojo (FTIR).

El espectro FTIR permite conocer la composición de sólidos, líquidos y gases o de materiales desconocidos⁷⁰, para las nanopartículas con biomasa residual se ve presentado en la Gráfica 3, la cual muestra cinco picos correspondientes a la síntesis de estos compuestos; determinados por los grupos funcionales en distintos puntos, el cual se basó en el estudio donde analizaron 60 muestras de frutas y vegetales⁷¹, promediando el número de onda y así encontrar los picos del material en estudio, en 3334 cm^{-1} (N-H stretching), 2949 cm^{-1} (C-H stretching), 1721 cm^{-1}

(C=O stretching), 1423 cm^{-1} (O-H bending), 1056 cm^{-1} (C-O stretching)⁷². Por otra parte las nanopartículas 508 cm^{-1} es asociado a el enlace (Fe-O), 1551 cm^{-1} y 3743 cm^{-1} corresponden a vibraciones de resonancia incrementando la amplitud de los hidroxilos en la superficie de la magnetita⁷³. Una fuerte absorción a 1056 cm^{-1} surge del estiramiento de los enlaces simples de C-O. Este resultado revela que la molécula de biomasa fue adherida a núcleo magnético de magnetita Fe_3O_4 como carboxilato⁷⁴, el cual es el producto de la reacción química entre un ácido orgánico de la cascara de plátano y un ion metálico proveniente de las nanopartículas demostrando que la biomasa modifico la estructura original de la magnetita.

Gráfica 3. Espectros FTIR.

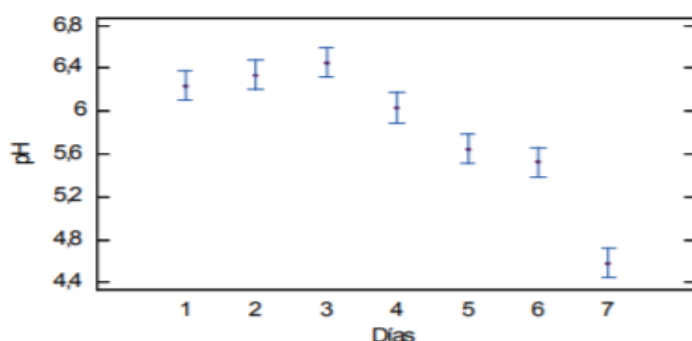


Fuente: Autores

11.1.4 Caracterización de Biomasa Residual.

Debido a la situación actual del país (2021) no se dispuso del tiempo suficiente para realizar los ensayos de caracterización de la biomasa residual de plátano, se encontró un análisis realizado en la Universidad de la Gran Colombia en el año 2014, dicho estudio ayudo a encontrar una variable importante para el presente proyecto el cual es el pH, en la gráfica 4 se evidencia que la cascara de plátano presenta valores de pH entre 6.2 y 4.6, estos valores iban variando en un periodo de almacenamiento de 7 días y que la disminución del pH se daba por la maduración del mismo, esto se interpreta que para las cascara de plátano verde como se evidencia en el numeral 11.2 fueron usados para la preparación de la biomasa por lo que se deduce que este material presenta un pH de 6.2^{75} .

Gráfica 4. pH de Biomasa Residual almacenada a 24° C durante 7 días.



Fuente: Caracterización fisicoquímica del plátano (*Musa paradisiaca* sp. AAB, Simmonds) para la industrialización⁷⁵.

11.1.5 Caracterización de Agua Sintética.

El agua sintética en las diferentes etapas de estudio se encontraron los siguientes parámetros:

Tabla 4 Caracterización de Agua Sintética

<i>Parámetros</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cantidad</i>		
		<i>Agua Residual</i>	<i>Agua Residual - Biomasa Residual</i>	<i>Agua Residual - Biomasa Residual@MNPS</i>
pH	Unidades de pH	3,4	4	9,6
Temperatura	°C	19,1	19,6	19,9
Conductividad	μS/cm	326	458	1086
Turbiedad	NTU	7,2	11,3	24
Alcalinidad de Fenolftaleína	mgCaCO ₃ /L	50	70	105
Alcalinidad Total	mgCaCO ₃ /L	80	110	145
Sólidos disueltos totales	mg/L	177	244	580
Dureza Ca	mg/L	0,11	0,21	0,81
Dureza Mg	mg/L	0,5	0,11	0,41
Color	PtCo	8	99	438

Fuente: Autores.

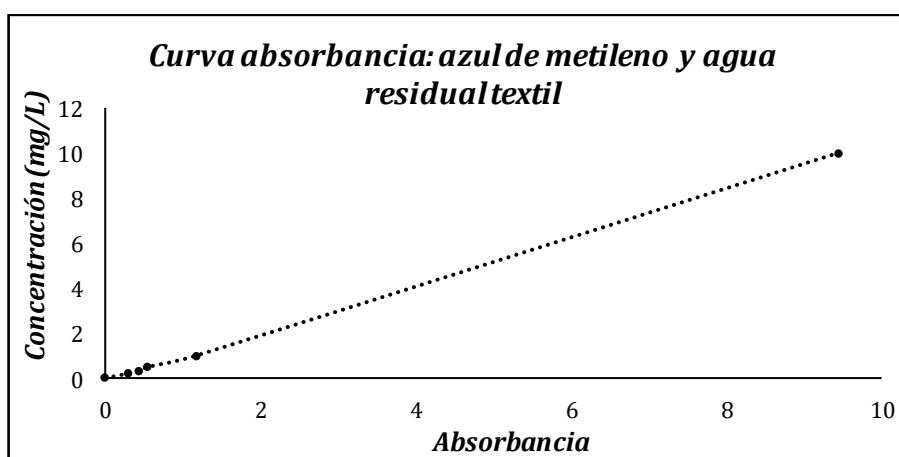
Se midió la absorbancia mediante el espectrofotómetro, para cada tipo de ensayo y mediante la curva de calibración (Tabla 5 y Gráfica 5) se determina cada una de las concentraciones finales correspondiente a cada dato de absorbancia.

Tabla 5. Dilución azul de metileno con agua residual sintética

<i>Concentración (mg/L)</i>	<i>Absorbancia</i>
0	0
0,2	0,292
0,3	0,455
0,5	0,545
1	1,175
10	9,443

Fuente: Autores

Gráfica 5. Curva de calibración



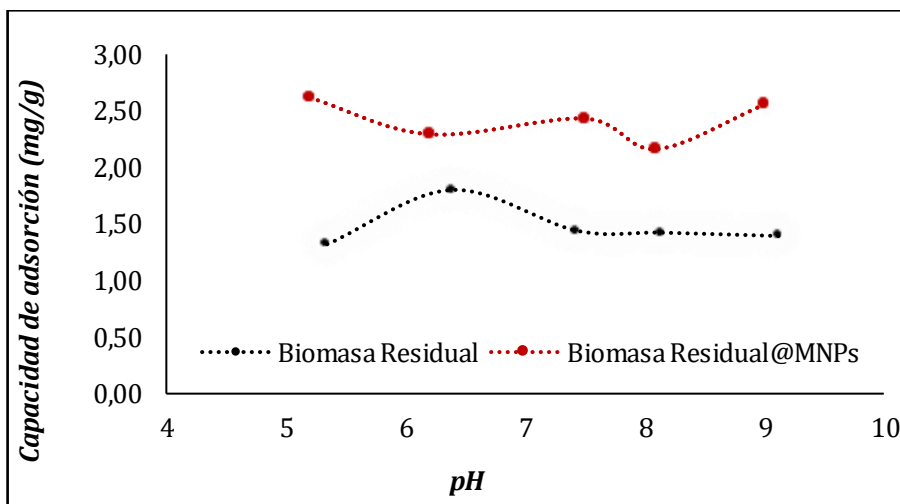
Fuente: Autores

11.2 EFECTO DE PH

El pH es una variable importante de analizar, ya que puede afectar el comportamiento de los compuestos en contacto dentro de una disolución y por lo tanto el proceso de adsorción, puesto que afecta tanto la protonación de los grupos funcionales de la superficie adsorbente del nanomaterial y biomasa residual encontrados en el numeral 11.1.3, como la incidencia de las especies químicas presentes en la disolución. Por este motivo se realizaron estudios Batch de adsorción en un rango de pH de 5 a 9 (Gráfica 5) para remover azul de metileno por medio de *BiomasaResidual@MNPs* y Biomasa Residual.

El análisis se realizó con una concentración inicial de azul de metileno 2 mg/L, una dosis de *BiomasaResidual@MNPs* 500 mg/L; 120 RPM, con temperatura de T=14° C, durante 60 minutos.

Gráfica 6. Efecto de pH en la adsorción del contaminante.



Fuente: Autores

Para el caso de la adsorción de azul de metileno, la adsorción se vio favorecida cuando los valores de pH son cercanos 6.38 Biomasa Residual y 5.2 BiomasaResidual@MNPs, donde se evidencio que tiene un comportamiento ácido, ya que presentó un mayor valor de capacidad de adsorción con relación a los valores de pH básicos. Esto se da ya que el azul de metileno es un colorante catiónico, que son atraídos a los componentes ácidos de forma natural, favoreciendo la adsorción, siendo congruente con reportes anteriores⁷⁶.

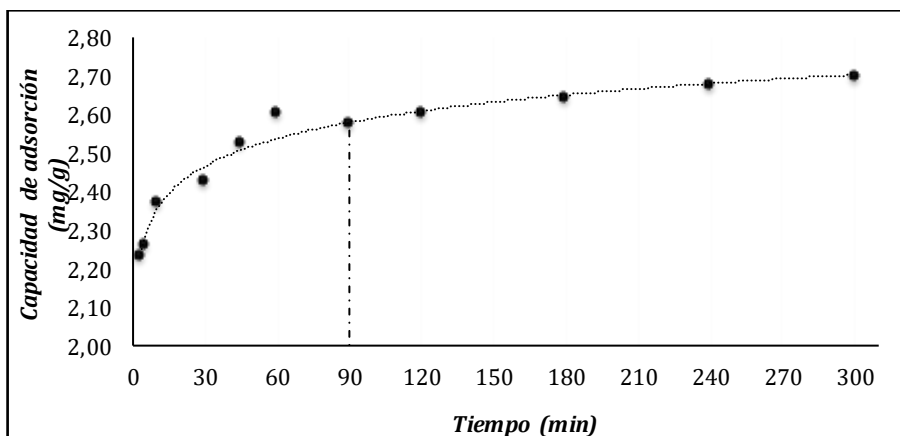
11.3CINÉTICA DE ADSORCIÓN

Analizando el comportamiento de la capacidad de adsorción de la cascara de plátano a diferentes tiempos de agitación en la Gráfica 7, se encuentra que el tiempo en el que deja de presentar grandes variaciones de adsorción es sobre los 90 minutos aproximadamente, ya que a este tiempo tiene una adsorción de 2,57 mg/g, a 5 horas es 2,70 mg/g y a 24 horas es 2,86 mg/g, presentando solo una variación de 0,13 mg/g y 0,29 mg/g respectivamente.

La biomasa residual presenta un tiempo superior a lo obtenido en la literatura utilizando otros tipos de biomosas⁷⁷⁻⁷⁸. Cabe resaltar que esto varía dependiendo las condiciones, cantidad de material adsorbente, concentración inicial del contaminante con las que se realizaron los análisis de la capacidad de adsorción vs tiempo. Sin embargo, estos resultados pueden disminuir con la ayuda de otros compuestos, para así mejor los tiempos y la adsorción.

Las condiciones experimentales al momento del ensayo son: 2 mg/L Azul de metileno; dosis de Biomasa 0.05 g; 120 RPM y con temperatura de T=14° C.

Gráfica 7. Tiempo de equilibrio de capacidad de adsorción con biomasa.

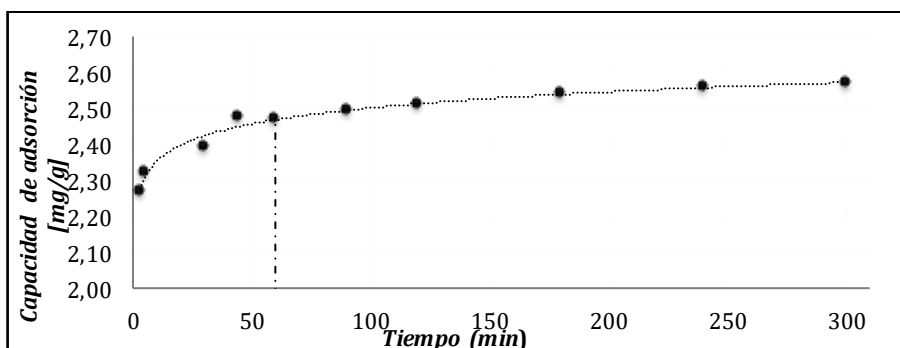


Fuente: Autores

Como se muestra en la Gráfica 8, las nanopartículas sintetizadas con biomasa residual evidencian una mejora con respecto a la biomasa, donde no se observa grandes cambios a partir de un tiempo aproximado de 60 minutos y una adsorción de 2,47 mg/g, teniendo en cuenta que, a las 5 y a 24 horas presentan una adsorción de 2,57 mg/g y 2,67 mg/g, evidenciando una pequeña variación de tan solo 0,1 mg/g y 0,2 mg/g.

La *BiomasaResidual@MNPs* presenta un tiempo inferior a lo obtenido en la literatura utilizando otros tipos de nanomateriales⁷⁹. Esto representa que la combinación entre la cascara de plátano y la magnetita, demuestran un buen comportamiento en el tiempo de adsorción de contaminantes presentes en el agua de estudio. Las condiciones experimentales al momento del ensayo son: 2 mg/L Azul de metileno; dosis de nanomaterial 0.05 g; 120 RPM y con temperatura de $T=14^{\circ}$ C.

Gráfica 8. Tiempo de equilibrio de capacidad de adsorción con *BiomasaResidual@MNPs*.

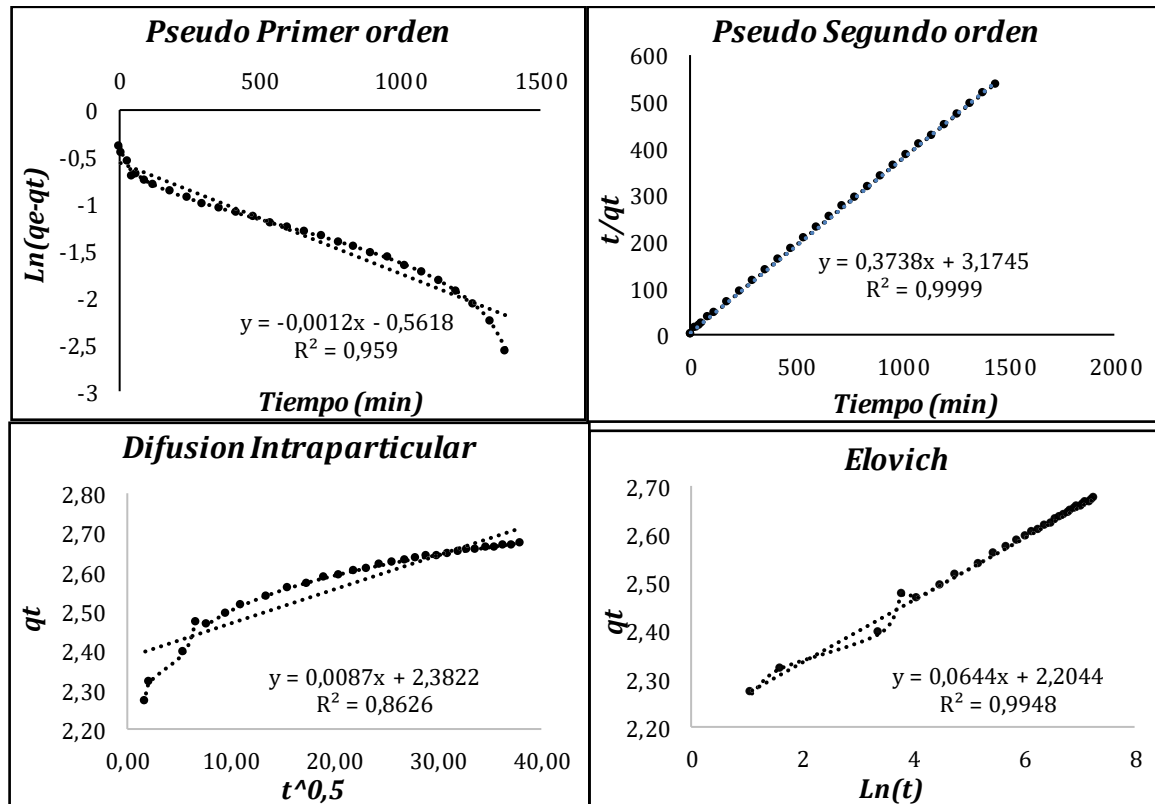


Fuente: Autores

Las diferencias entre las diferentes variables que intervienen en el estudio, pueden generar variación en los tiempos de equilibrio, ya que, a mayor concentración de contaminante, mayor tiempo de adsorción se requerirá, para entender mejor este comportamiento cinético, se generó un análisis experimental con los modelos cinéticos, con tendencia lineal Gráfica 9.

De las tendencias lineales, se puede apreciar que el modelo cinético el cual presenta mejor ajuste a los datos experimentales y puede describir de la mejor manera la cinética de adsorción de azul de metileno con *BiomasaResidual@MNPs* es el modelo de Pseudo Segundo Orden. Esto da a entender que la velocidad de interacción entre el adsorbato y el adsorbente se rige con reacciones químicas, a esto se le denomina adsorción química.

Gráfica 9. Modelo lineal de cinética de adsorción con azul de metileno con *BiomasaResidual@MNPs*.



Fuente: Autores

Tabla 6. Parámetros de la cinética de adsorción de Azul de metileno.

	Parámetro	Valor
Pseudo-Primer Orden	qe [mg/g]	0,2742837
	K ₁ [min ⁻¹]	-0,0012
	R ²	0,959
Pseudo-Segundo Orden	qe [mg/g]	2,675227394
	K ₂ [mg*g ⁻¹ *min ⁻¹]	0,044015259
	R ²	0,9999
Elovich	α [mg/(g*min)]	47283003779538
	β [g/mg]	15,5
	R ²	0,9948
Difusión Intraparticulard	C [mg/g]	0,0087
	Ki [mg*g ⁻¹ *min ^{-1/2}]	2,3822
	R ²	0,8626

Fuente: Autores

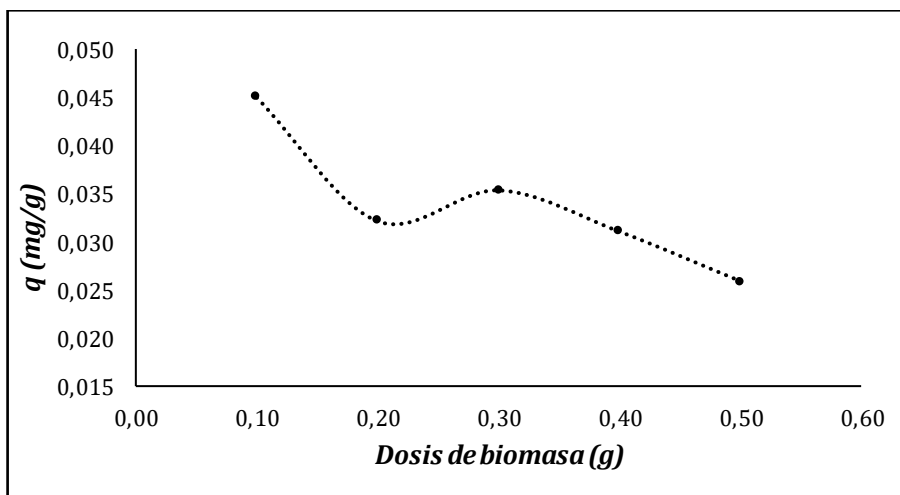
Donde qe (mg/g) es la cantidad de contaminante adsorbido en el equilibrio, K₁ (min⁻¹) y K₂ (mg*g⁻¹*min⁻¹) es la constante cinética de Pseudo-primer orden y Pseudo-segundo orden respectivamente, α [mg/(g*min)] es la velocidad inicial de adsorción y β (g/mg) constante de desorción, C (mg/g) es el intercepto y Ki (mg*g⁻¹*min^{-1/2}) es la constante de velocidad de difusión intraparticulard⁸⁰.

En la Tabla 6 se puede observar los parámetros de obtenidos de los modelamientos para la cinética de adsorción. El modelo que mejor ajusta es el de Pseudo segundo orden ya que el coeficiente de correlación de Pearson (R²) es el que está más cercano a la unidad, lo cual muestra que la velocidad de adsorción es rápida y favorable hacia los grupos funcionales expuestos del nanomaterial de *BiomasaResidual@MNPs* en el numeral 11.1.3.

11.4 ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

La isoterma de adsorción representa el equilibrio que relaciona la cantidad de un material adsorbido en una superficie a temperatura constante presente en una solución⁸¹⁻⁸², analizando varias muestras con diferentes cantidades de biomasa, para así demostrar que este material favorece la adsorción de Azul de metileno, la (Gráfica 10) muestra una relación inversamente proporcional entre la capacidad de adsorción y la dosis del material, demostrando que a menos cantidad de material adsorbente presenta mayores datos de capacidad de adsorción. Todo esto se analizó a una temperatura de 14° C, con un Bath de 100 mL, una cantidad de cascara de plátano entre (0,1 - 0,6) g y una concentración inicial de 0,291 mg/L.

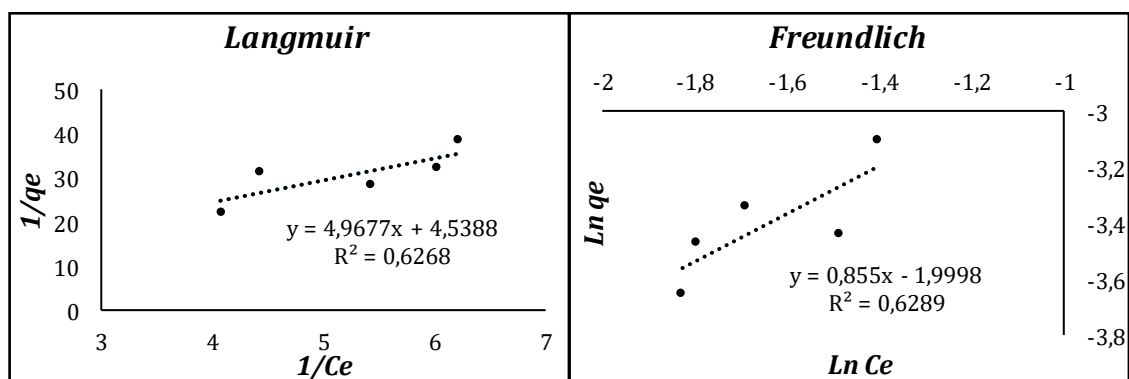
Gráfica 10. Isotherma de adsorción para Azul de metileno con biomasa residual.



Fuente: Autores

Mediante la Gráfica 11 se realiza los ajustes lineales producto de estos modelos, como se muestran en la Tabla 6. Se evidencia que los coeficientes de correlación son similares, sobre 0.62, este factor es importante para definir qué modelo se ajusta más para describir el equilibrio de adsorción de Azul de metileno con biomasa residual, siendo el más acorde Freundlich.

Gráfica 11. Linealización de modelos isotérmicos en la adsorción Azul de metileno con biomasa residual.



Fuente: Autores

Con los parámetros resultado del análisis se identifica que la capacidad máxima de adsorción (q_m) de *BiomasaResidual@MNPs* con el Azul de metileno es de 0,220 con un coeficiente $1/n$ de Freundlich de 0.89 el cual es menor a la unidad, lo que da a entender que presenta una afinidad aceptable entre el material y el contaminante.

Tabla 7. Parámetros de las isotermas de adsorción con biomasa.

	<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
<i>Langmuir</i>	q_m [mg/g]	0,220
	KL [L/mg]	0,913
	R^2	0,6268
<i>Freundlich</i>	K_f [mg*g ⁻¹ (L*mg) ⁿ]	0,135
	n	1,129
	R^2	0,6289

Fuente: Autores

Donde q_m (mg/L) es la capacidad máxima de adsorción del material, KL (L/mg) la constante de equilibrio de Langmuir, y K_f [mg*g⁻¹(L*mg)ⁿ] la constante de equilibrio de Freundlich, n es la exponente intensidad de adsorción⁸³.

En la Tabla 8 se compararon otros estudios en los que se analiza el Azul de metileno con distintos tipos de biomasa, la capacidad de adsorción del material de estudio está en el promedio de los valores comparados, ya que, aunque no es de los más altos, es pertinente analizar la relación entre q_m/C_o para de esta manera determinar que material presenta un mejor comportamiento en función de la capacidad de adsorción sin tener en cuenta la concentración inicial del contaminante, lo anterior permite establecer que la cascara de plátano presenta mejor capacidad que otros.

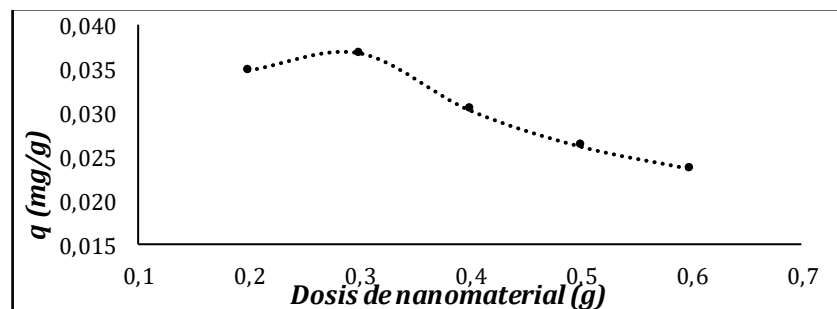
Tabla 8. Máxima capacidad de adsorción de azul de metileno con diferentes biomazas.

<i>MATERIAL - BIOMASA</i>	q_m (mg/g)	C_o (mg/L)	<i>Relación q_m/C_o</i>	<i>Referencia</i>
Torta aceite de girasol	10,21	250	0,0408	84
Hoja de loto	221,7	200	1,1085	85
Algas muertas	107	40	2,6750	86
Polímeros levadura de panadería	51,5	100	0,5150	87
Semillas de Girasol	215	100	2,1500	88
Cascara de ajo	82,64	200	0,4132	89
Este trabajo	0,220	0,291	0,7560	

Fuente: Autores

En la Gráfica 12 donde analiza la capacidad de adsorción vs cantidad de *BiomasaResidual@MNPs*, se presenta un comportamiento similar al de la Gráfica 11, esto se da ya que, con una alta cantidad de contaminante y menor cantidad de biomasa se presenta mayor disponibilidad de sitios activos donde interactúen los cationes presentes en el Azul de metileno, favoreciendo así su adsorción. Por el contrario, cuando se agrega una mayor cantidad de *BiomasaResidual@MNPs* estos sitios activos se saturan, reduciendo su capacidad de adsorción, lo que da entender que no es necesario duplicar la cantidad de nanomaterial para eliminar el más contaminante.

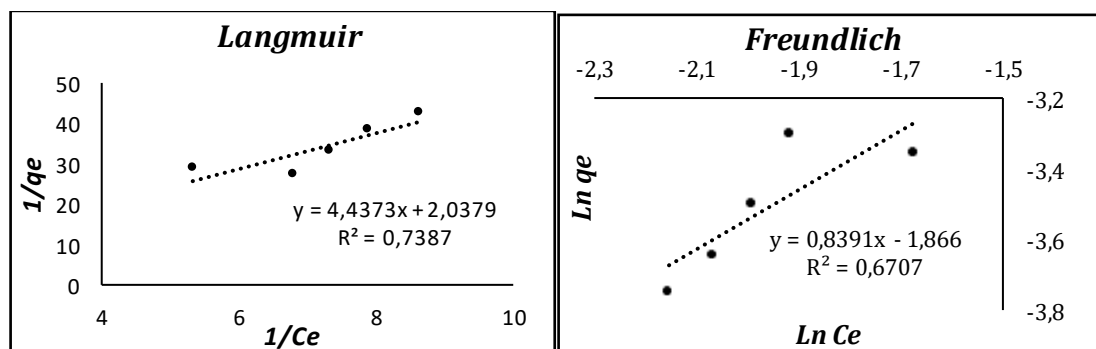
Gráfica 12. Isoterma de adsorción para Azul de metileno con *BiomasaResidual@MNPs*.



Fuente: Autores

Mediante los modelos isotérmicos de ajustes lineales de se determinó la capacidad máxima de adsorción en la Gráfica 13.

Gráfica 13. Linealización de modelos isotérmicos en la adsorción Azul de metileno con *BiomasaResidual@MNPs*.



Fuente: Autor

Con los coeficientes de correlación se muestra en la Tabla 9, se identificó que el modelo que más se ajusta es de Langmuir ya que es el mayor y ayuda a describir el equilibrio de adsorción del contaminante con *BiomasaResidual@MNPs*.

Tabla 9. Parámetros de las isotermas de adsorción con *BiomasaResidual@MNPs*.

	Parámetro	Valor
Langmuir	q_m [mg/g]	0,490
	KL [L/mg]	0,463
	R ²	0,7387
Freundlich	Kf [mg*g ⁻¹ (L*mg) ⁿ]	0,155
	n	1,192
	R ²	0,6707

Fuente: Autores

Se compararon otros estudios en la Tabla 10, donde se analizó la adsorción de Azul de metileno con nanopartículas y diferentes compuestos, la capacidad de adsorción del material de estudio arrojó datos aceptables, basándose en la relación q_m/C_o , siendo la síntesis entre la magnetita y la biomasa residual una buena opción para la remoción de este tipo de contaminante.

Tabla 10. Máxima capacidad de adsorción de azul de metileno con diferentes biomazas.

MATERIAL	q_m (mg/g)	C_o (mg/L)	Relación q_m/C_o	Referencia
Síntesis de esferas de geopolímero a base de cenizas volantes de biomasa porosa	4,1	7500	0,00055	90
Compuesto magnético de grafeno-nanotubos de carbono	65,79	35	1,879	91
Nanopartículas de platay paladio cargadas en carbón activado	71,43	20	3,572	92
Macro-nanopartículas de polianilina y polipirrol sintetizadas por polimerización iniciada por C-Dot	19,67	100	0,196	93
Nanopartículas de óxido de zinc	21,79	60	0,363	94
Nanopartículas de Ho-CaWO ₄ utilizando técnicas de Metodología de superficie de respuesta (RSM) y Red neuronal artificial (ANN)	103,09	80	1,289	95
Biomasa de <i>Agrobacterium fabrum</i> inmovilizada junto con nanopartículas de óxido de hierro	800	200	4,000	29
Biocarbón magnético derivado de biomasa de desechos agrícolas	22,8	100	0,228	96
Biocarbón magnético y carbón activado mediante extrusión en molino de bolas con nanopartículas de Fe ₃ O ₄	18,3	250	0,073	97
Este trabajo	0,490	0,257	1.907	

Fuente: Autores

11.5 SIMULACIÓN COLUMNA DE ADSORCIÓN (AZUL DE METILENO)

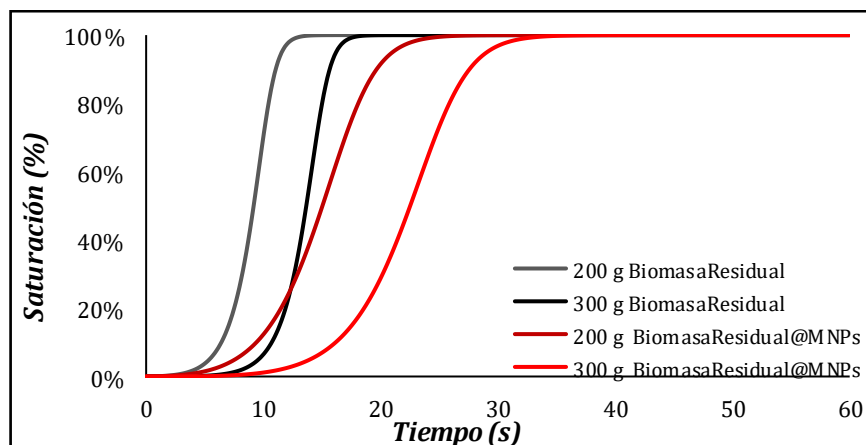
Debido a la situación del país actual no se tuvo con el tiempo suficiente para crear un modelo a escala de la columna, sin embargo para una simulación óptima el software FAST 2.1 beta, permitió modificar la concentración del contaminante en el filtro de lecho fijo, volumen tratado y cantidad del material adsorbente, estas variaciones se evaluaron en función del tiempo de funcionamiento⁹⁸ y se seleccionó el modelo isotérmico, ingresando los parámetros operacionales correspondientes a Langmuir y Freundlich descritos en las Tablas 7 y 9 respectivamente para cada material de análisis. Esto para determinar que cantidad de material es óptima para alargar los tiempos de funcionamiento de la columna, ya que cuando se satura deja de remover el contaminante de estudio.

11.5.1 Variación cantidad del material adsorbente.

Para encontrar las cantidades del material adsorbente óptimas, se realizaron varias iteraciones entre los dos modelos isotérmicos analizados en el estudio, encontrando que para 200 y 300 g los dos materiales de estudio pueden llegar a una saturación promedio entre un 90 a 100%, en donde si se aumentaba las dosis del material su saturación era inferior al 70% y si era una menor cantidad, su saturación era muy apresurada sobre los primeros segundos de funcionamiento.

Para esta modelación se utilizó en el tiempo de operación de un minuto, un caudal de 1,6 L/s y una concentración inicial de 2 mg/L, en donde en la Gráfica 14 se evidencia que la biomasa residual de plátano presenta una saturación prematura a tan solo 10 segundos en comparación de la BiomasaResidual@MNPs donde evidencia mejoras de un 50 % en estos tiempos de operación con las variables de Langmuir.

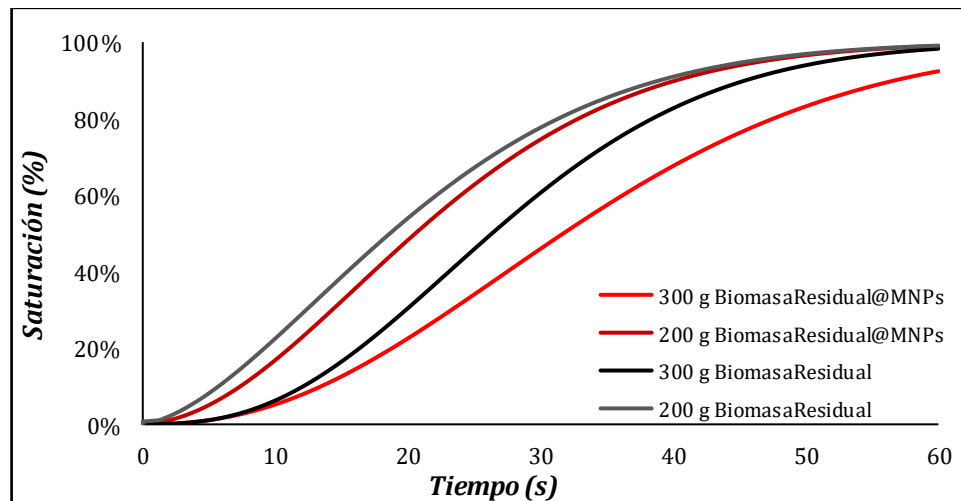
Gráfica 14. Capacidad de adsorción con variación de biomasa residual y *BiomasaResidual@MNPs* mediante parámetros de Langmuir.



Fuente: Autores

Para el caso de los parámetros de Freundlich en la Gráfica 15 se evidencia una mejora en los tiempos de saturación de la columna y más en la curva de la *BiomasaResidual@MNPs* el cual no llega a saturarse en el tiempo de funcionamiento analizado, además, los 300 gramos de material adsorbente se postula como una cantidad óptima para el tratamiento de efluentes contaminados por Azul de metileno.

Gráfica 15. Capacidad de adsorción con variación de biomasa residual y *BiomasaResidual@MNPs* mediante parámetros de Freundlich.



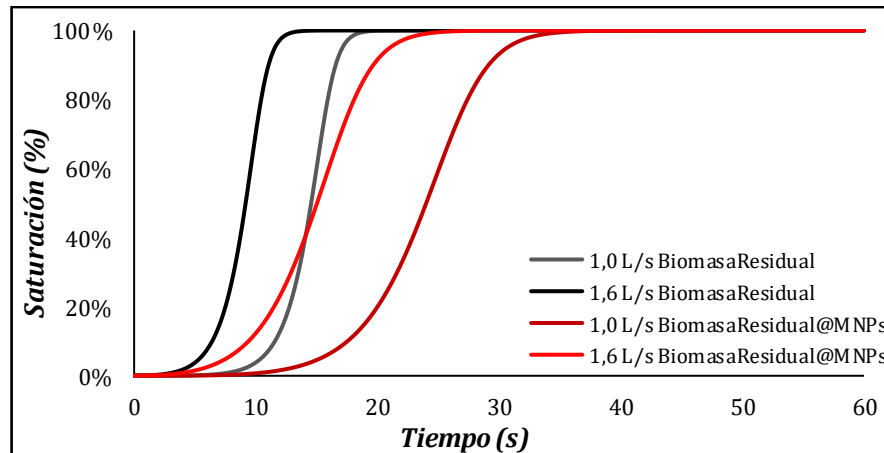
Fuente: Autores

10.5.2 Variación de caudales.

Para analizar el comportamiento de la columna se evaluó el caudal para una bomba peristáltica pequeña y los análisis se hicieron con una concentración inicial de 2 mg/L y una masa de 300 g elegida por su comportamiento aceptable en el ítem 10.9.1.

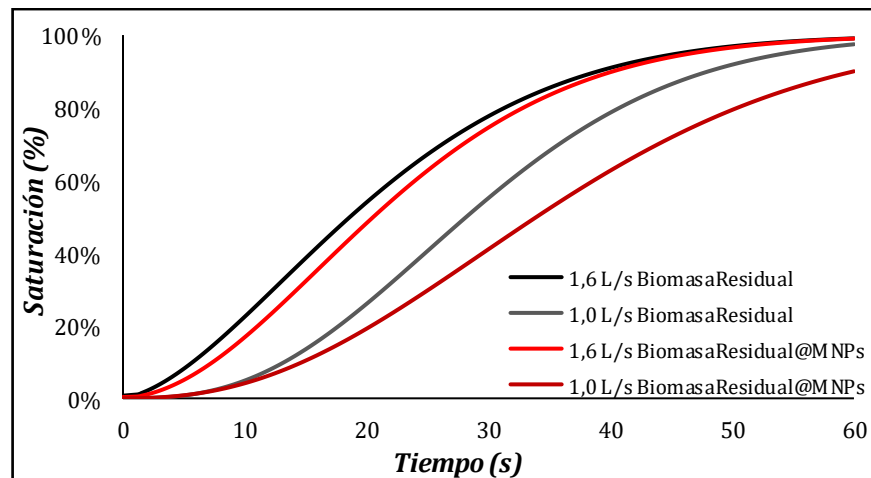
En las Gráficas 16 y 17 para Langmuir y Freundlich respectivamente, se logra entender que un caudal óptimo para remover el contaminante es de 1 L/s, ya que a menos caudal el filtro puede trabajar de una mejor forma, consiguiendo mayores tiempos antes de llegar a una saturación total que otros caudales.

Gráfica 16. Capacidad de adsorción con biomasa residual y *BiomasaResidual@MNPs* mediante parámetros de Langmuir variando caudales.



Fuente: Autores

Gráfica 17. Capacidad de adsorción con biomasa residual y *BiomasaResidual@MNPs* mediante parámetros de Freundlich variando caudales.



Fuente: Autores

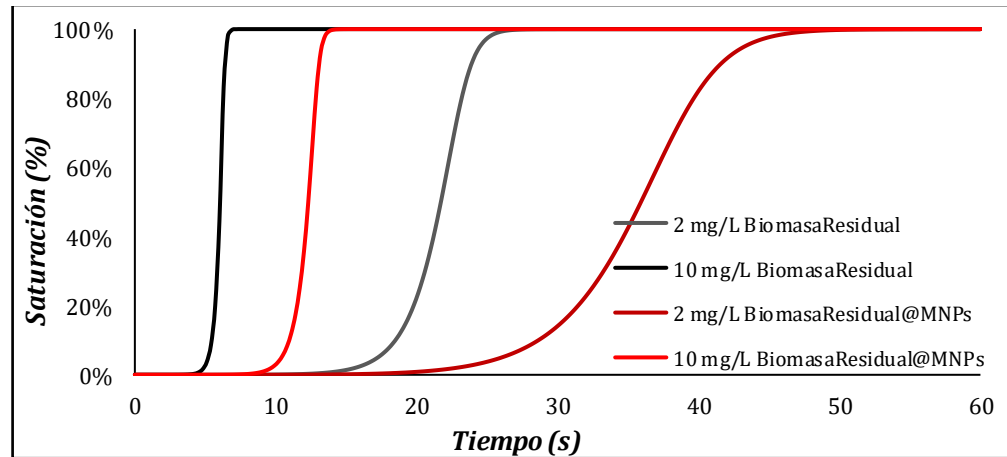
11.5.3 Variación de concentración.

En las Gráficas 18 y 19 se evidencia el comportamiento de la columna variando las concentraciones del contaminante, los análisis se realizaron con un caudal de 1,0 L/s y una masa de 300 g parámetros utilizados puesto que se evidencio un comportamiento optimo en las gráficas anteriores.

Por medio de los parámetros de Langmuir se nota claramente que se presenta una rápida saturación cuando la concentración del Azul de metileno es de 10 mg/L, pero

siempre evidenciando un mejor comportamiento con el material principal de estudio, esto da a entender que la columna presenta mejores tiempos de saturación cuando el contaminante tiene una menor concentración, ya que permite trabajar al material adsorbente de una forma eficiente.

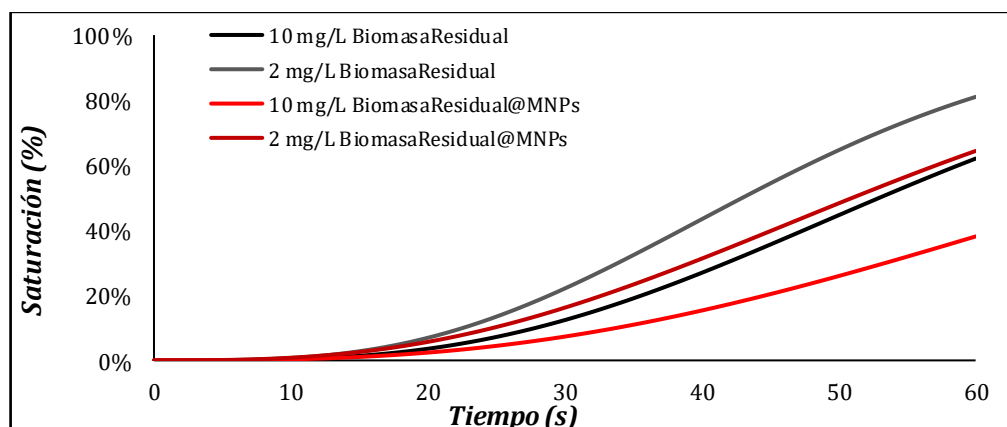
Gráfica 18. Capacidad de adsorción con biomasa residual y *BiomasaResidual@MNPs* mediante parámetros de Langmuir variando concentración inicial.



Fuente: Autores

Sin embargo, por medio de los parámetros de Freundlich (Gráfica 19), se encontraron resultados aun mejores, ya que independiente de la concentración del contaminante los filtros de la columna no llegan a una saturación del 100% por ejemplo la *BiomasaResidual@MNPs* cuando en el agua sintética presenta una concentración de 10 mg/L solo alcanza una saturación de aproximadamente 38%, resultados alentadores para así generar análisis un poco más profundos de la adsorción de elementos contaminantes y así poder comparar los resultados de esta simulación por medio de software Fast 2.1 beta con un modelo a escala en laboratorio y validar la eficiencia de las nanopartículas sintetizadas con biomasa residual de plátano.

Gráfica 19. Capacidad de adsorción con biomasa residual y *BiomasaResidual@MNPs* mediante parámetros de Freundlich variando concentración inicial.



Fuente: Autores

Según los análisis anteriores indicar parámetros exactos en donde la columna de adsorción trabaje de una forma aceptable es algo complejo debido a las variaciones entre los resultados con respecto a los parámetros de Langmuir y Freundlich, sin embargo, utilizando los mejores tiempos de saturación las variables a utilizar para que el material propuesto sea una opción viable se de evidencian en la Tabla 11.

Tabla 11 Máxima capacidad de adsorción de azul de metileno con diferentes biomazas.

PARÁMETRO OPERATIVOS		
PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
Cantidad de material adsorbente	>300	g
Caudal	1	L/s
Porosidad	20	%
Tiempo de contacto del lecho	60	s
Concentración de Azul de metileno	10	mg/L

Fuente: Autores

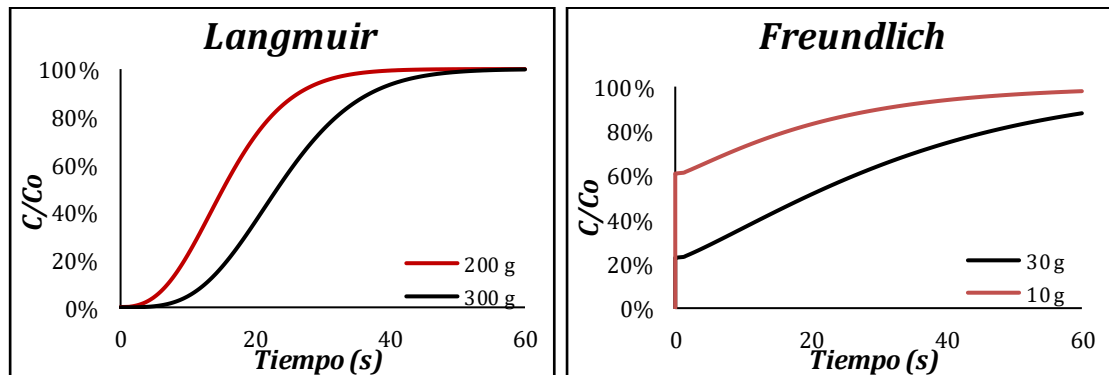
11.6 SIMULACIÓN COLUMNA DE ADSORCIÓN (MERCURIO)

Debido a la falta de tiempo por la contingencia actual y situación del país, no se pudo realizar los ensayos de Batch y Continuo para la remoción de mercurio, por lo tanto para la siguiente simulación se utilizó una investigación con similares materiales a los de estudio para la remoción de mercurio, donde analizaron nanopartículas con biomasa residual de ñame, con unos parámetros de Langmuir: $q_m=215.6$, $KL=0.006$ y para Freundlich $K_f=1.562$ y $N=0.852$ ¹⁸.

11.6.1 Variación cantidad del material adsorbente.

En la simulación con los parámetros de Langmuir, presenta un comportamiento similar al evidenciado por *BiomasaResidual@MNPs* para la remoción con azul de metileno que, para 300 g de material adsorbente, muestra mejores tiempos de saturación, por el contrario, en los parámetros de Freundlich se necesita menor cantidad de material siendo 30 g el más óptimo (Gráfica 20), ya que con una mayor masa no se logra saturación en ningún punto.

Gráfica 20. Capacidad de adsorción *Ñame@MNPs* mediante parámetros de Langmuir y Freundlich.

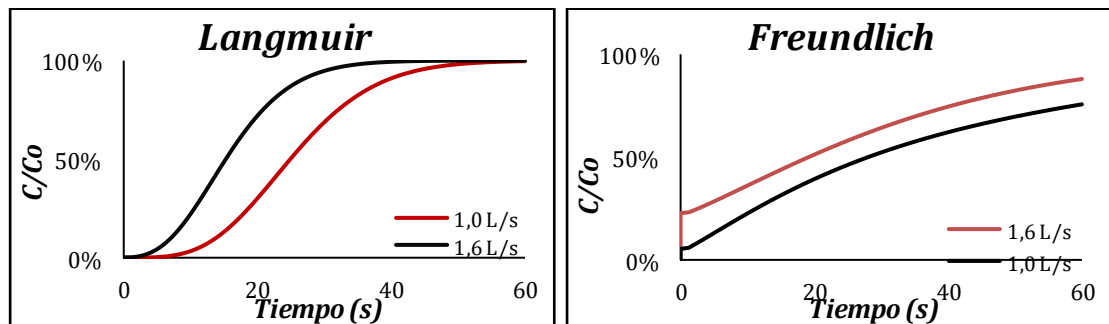


Fuente: Autores

11.6.2 Variación de caudales

Para el análisis variando los caudales se evidencia para Langmuir y Freundlich que con un caudal menor permite prolongar la saturación de la columna, beneficiando la remoción del mercurio, teniendo en cuenta que para Freundlich se utiliza 30 g de nanomaterial y en Langmuir 300 g como se evidencia en la Gráfica 21.

Gráfica 21. Capacidad de adsorción con *Ñame@MNPs* variando de caudal mediante parámetros de Langmuir y Freundlich.

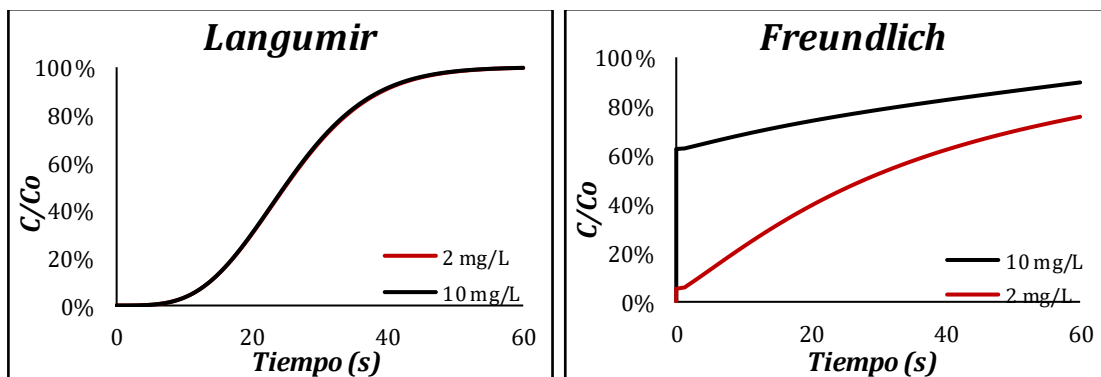


Fuente: Autores

11.6.3 Variación de concentración

Para la variación de concentración inicial (Gráfica 22), se puede evidenciar que en Langmuir para diferentes cantidades de concentración del contaminante presenta intervalos de saturación iguales cuando de capacidad de adsorción máxima se habla, siendo esto favorable cuando la columna esté en funcionamiento ya que permite remover mayor concentración de mercurio con los mismos tiempos de saturación. En Freundlich ocurre lo contrario ya que con una mayor concentración (10 mg/L) la saturación es más rápida, reduciendo la efectividad de remoción, lo mejor usando este modelo es manejar bajas concentraciones.

Gráfica 22. Capacidad de adsorción con $\tilde{N}ame@MNPs$ variando concentración inicial mediante parámetros de Langmuir y Freundlich.



Fuente: Autores

Se puede identificar que entre estos dos modelos isotérmicos existen grandes variaciones con relación al Azul de metileno y el mercurio, considerando que son dos contaminantes de diferente estructura, esto con lleva a que sea necesario la elaboración de una columna de adsorción en físico en donde se pueda establecer el verdadero tiempo de saturación del material de estudio.

12 APLICACIÓN A ESCALA

Para dar un aproximado en términos de costos de aplicación a escala industrial del material propuesto, se encontró que en promedio una compañía textil produce 51.993 m³ de agua residual al año⁹⁹, lo que es igual a 0.1424 m³/día, valor que se tomó como el flujo promedio a tratar y analizando la resolución 0631 de marzo de 2015, la cual estipula los límites de vertimiento permitidos en la hoja 16 aparece la actividad económica más relacionada a las industrias textiles “fabricación y manufactura de bienes” en donde no se reporta un límite en específico con referencia a “sustancias activas al azul de metileno”¹⁰⁰ por lo que se supuso que el agua a tratar presenta una concentración inicial de Azul de metileno de 10 mg/L y se estima llegar a una concentración final de 0 mg/L para un 100% de eliminación del mismo, la cantidad de nanomaterial requerido se calculó por medio de la siguiente ecuación:

$$\dot{m} = \frac{Q(C_i - C_f)}{q_m} F$$

Ecuación en donde la variable \dot{m} es la cantidad de nanomaterial necesario para el tratamiento (g/día), Q es el caudal por tratar (L/día), C_i es la concentración inicial del contaminante (mg/L), C_f es la concentración a la que se quiere llevar el contaminante en el efluente de salida (mg/L), F es un factor de seguridad de tratamiento con valores de 1.3 a 1.7 dependiendo de las características fisicoquímicas del agua.

Por tal motivo, aplicando la ecuación anterior con un parámetro F de 1.5 y capacidad máxima de adsorción de 0.49 mg/g, la cantidad necesaria para tratar este flujo sería de 4359.18 g/día de *BiomasaResidual@MNPs*.

12.1 COMPARACIÓN CON TECNOLOGÍAS EXISTENTES

Con la intención de comparar con otras tecnologías existentes, se muestra Tabla 12 un comparativo del costo de producción de 1 g de nanomaterial con respecto a carbón activado y nanopartículas magnéticas obtenidas por vía convencional modificadas con DMSO (Dimetil sulfoxido).

Tabla 12. Comparación costo de producción a gran escala para 1 g de adsorbentes aptos en remoción de Azul de metileno.

TECNOLOGÍA	ÍTEM	CANTIDAD NECESARIA	VALOR UNITARIO (US\$/kg)	VALOR TOTAL (US\$/g)	
<i>BiomasaResidual@MNPs</i>	Fe (II)	2.97 g	0.04 ⁹⁶	0.0001188	
	Cisteína	6.75 g	9.76 ⁹⁷	0.06588	
	NaOH (50%)	2.2 g	0.3 ²⁷	0.00066	
	Agua	250 g	0.0012 ²⁷	0.0003	
	Gasto de operación				0.7
	TOTAL				0.7669
<i>Carbón activado</i>				0.98 ⁹⁸	
<u><i>Nanopartículas obtenidas por vía convencional DMSO@Fe3O4</i></u>				0.86 ⁹⁸	

Fuente: Autores

Para comparar estos compuestos se tiene en cuenta los siguientes ítems:

- Los cálculos se basan en un desperdicio del 30% aplicando un factor de 1.3.
- Los gastos de operación se calculan con dos operarios para un tiempo de trabajo de 4 horas a un valor de 2 SMLV (salario mínimo legal vigente 2021).
- El costo de la separación magnética fue de \$0.05 por gramo tomado de un estudio anterior¹⁰¹.
- Los precios a gran escala son tomados de compras online para precios industriales.

Se puede identificar que el costo de la aplicación del nanomaterial estudiado es significativamente más económico con las tecnologías comparadas.

13 CONCLUSIONES

- Por medio de los análisis en el laboratorio se logró determinar la composición del agua residual sintética de la industria textil antes y después de la remoción, lo que permitió comparar con lo estipulado en la resolución 0631 de 2015 en donde especifica los parámetros máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales en la fabricación de productos textiles. Obteniendo, que estas aguas presentan en su gran mayoría valores que no cumplen esta ley.
- Se sintetizó con éxito el material propuesto para la remoción compuesto por BiomasaResidual@MNPs y por medio de la caracterización se encontró una reducción en la saturación magnético siendo esta una propiedad fundamental del nanomaterial, con relación a la cristalografía la magnetita presenta una estructura cubica espinela según los picos generados. Por el contrario, la cascara de plátano no presentó picos propios de un material orgánico. Debido a la interacción entre estos dos materiales se generó un aumento en los picos lo que permitió encontrar los grupos funcionales presentes que permiten mejorar la reactividad entre los diferentes compuestos analizados, todo esto permitió establecer que a pesar de que la estructura general de la magnetita fue modificada, no se evidenciaron disminuciones en la capacidad de remoción del material.
- Mediante los ensayos Batch se determinó la capacidad máxima de adsorción del material de estudio con un valor de 0.49 mg/g que comparado con otros estudios y materiales similares es un valor promedio y aceptable para la remoción de azul de metileno presente en efluentes contaminados. Lo anterior, permitió simular el comportamiento del nanomaterial en una columna de adsorción para determinar las condiciones favorables para que no se sature prematuramente, para el caso del mercurio se evidenció que existen materiales aptos para su remoción.
- En el estudio de la eliminación del Azul de Metileno se dedujo que presenta una buena eficiencia para esta remoción con un valor del 55%, además el análisis de costo de producción a escala industrial para el material de estudio comparado con métodos convencionales, para el carbón activado presenta una reducción del 22% y para nanopartículas magnéticas obtenidas por vía convencional modificadas con DMSO (Dimetil sulfoxido) una disminución del 12%, evidenciando así que es una opción de material de bajo costo y fácil acceso.

14. RECOMENDACIONES

- Realizar neutralización y ajuste al mejor pH alrededor de 5 para así lograr una mejor remoción de hasta el 62%.
- Realizar la columna de adsorción a escala real para constatar los resultados obtenidos en el presente estudio.
- Generar un estudio más completo al comportamiento de adsorción de mercurio usando material de la presente investigación.
- Para implementar el material propuesto en sistemas de tratamiento y posterior distribución se debe tratar el agua residual para cumplir con la normativa de vertimientos.
- Para transferir los resultados obtenidos en la presente investigación, es pertinente mencionar que en dicho documento quedará en la base de datos de la biblioteca de la Universidad, donde se tendrá acceso para el público interesado.

15. BIBLIOGRAFÍA

1. Córdoba MA, Fernanda V, Coco D, et al. *Agua y Salud Humana*.
2. Sharma KP, Sharma S, Sharma S, et al. A comparative study on characterization of textile wastewaters (untreated and treated) toxicity by chemical and biological tests. *Chemosphere*. 2007;69(1):48-54. doi:10.1016/j.chemosphere.2007.04.086
3. Saratale RG, Saratale GD, Chang JS, Govindwar SP. Decolorization and biodegradation of textile dye Navy blue HER by *Trichosporon beigellii* NCIM-3326. *J Hazard Mater*. 2009;166(2-3):1421-1428. doi:10.1016/j.jhazmat.2008.12.068
4. Castillo M, Barceló D. Characterisation of organic pollutants in textile wastewaters and landfill leachate by using toxicity-based fractionation methods followed by liquid and gas chromatography coupled to mass spectrometric detection. In: *Analytica Chimica Acta*. Vol 426. Elsevier; 2001:253-264. doi:10.1016/S0003-2670(00)00828-X
5. Khan S, Malik A. Environmental and health effects of textile industry wastewater. In: *Environmental Deterioration and Human Health: Natural and Anthropogenic Determinants*. Vol 9789400778900. Springer Netherlands; 2014:55-71. doi:10.1007/978-94-007-7890-0_4
6. Contaminación generada por colorantes de la industria textil. Accessed May 28, 2021. <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/prepa4/article/download/1862/5730?inline=1>
7. Contreras M, Grande-Tovar CD, Vallejo W, Chaves-López C. Bio-removal of methylene blue from aqueous solution by *Galactomyces geotrichum* KL20A. *Water (Switzerland)*. 2019;11(2):282. doi:10.3390/w11020282
8. Cartaya OE. *Cinética de Adsorción de Iones Cobre (II) Por Una Mezcla de Oligogalacturónidos*; 2008. Accessed May 28, 2021. <https://www.researchgate.net/publication/28268980>
9. Nacional Agropecuaria E. *Boletín Técnico Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA)*.
10. Rice EW, Baird RB, Eaton AD. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition*.
11. tratamiento y valorización energética de residuos - Xavier Elías Castells -

- Google Libros. Accessed September 3, 2020. [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=qYmL8Q10TYcC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Castells,+X.+E.+\(2012\).+Tratamiento+y+valorizacion+energética+de+residuos.+Madrid:+Díaz+de+Santos.&ots=Fbbl--h2mP&sig=-kTU-LvieKcMD9JfoI7d7qoNr0#v=onepage&q=Castells%2C X. E. \(2012\). Tratamiento y valorizacion energética de residuos. Madrid%3A Díaz de Santos.&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=qYmL8Q10TYcC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Castells,+X.+E.+(2012).+Tratamiento+y+valorizacion+energética+de+residuos.+Madrid:+Díaz+de+Santos.&ots=Fbbl--h2mP&sig=-kTU-LvieKcMD9JfoI7d7qoNr0#v=onepage&q=Castells%2C X. E. (2012). Tratamiento y valorizacion energética de residuos. Madrid%3A Díaz de Santos.&f=false)
12. Claudia I, Marín V, Beatriz González Monroy A. *FIBRAS TEXTILES NATURALES SUSTENTABLES Y NUEVOS HÁBITOS DE CONSUMO Sustainable Natural Textile Fibres and Consumption Habits.*; 2013.
 13. Salas G, Condorhuaman C. *HUELLA DE CARBONO EN LA INDUSTRIA TEXTIL*. Vol 12.; 2009. Accessed September 3, 2020. <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/quim/article/download/4314/3442>
 14. Cód. 3 *Er Censo Nacional Agropecuario CENSO NACIONAL AGROPECUARIO DÉCIMA ENTREGA RESULTADOS-2014*.
 15. Meneses MM, Agatón LL, Fernando L, et al. Aprovechamiento industrial de residuos de cosecha y poscosecha del plátano en el Departamento de Caldas. *Rev Educ en Ing.* 2010;5(9):128-139. Accessed September 3, 2020. www.acofi.edu.co
 16. Haro-Velasteguí AJ, Borja-Arévalo AE, Triviño-Bloisse SY. Análisis sobre el aprovechamiento de los residuos del plátano, como materia prima para la producción de materiales plásticos biodegradables Analysis on the use of banana waste, as raw material for the production of biodegradable plastic materials Análise da utilização da bananeira resíduos como matéria-prima para a produção de plásticos biodegradáveis. *Dominio las Ciencias, ISSN-e 2477-8818, Vol 3, N° 2, 2, 2017, págs 506-525.* 2017;3(2):506-525. doi:10.23857/dom.cien.pocaip.2017.3.2.esp.506-525
 17. Tiwari DK, Behari J, Sen P. Application of Nanoparticles in Waste Water Treatment 1.
 18. Marimón-Bolívar W, Tejeda-Benítez L, Herrera AP. Removal of mercury (II) from water using magnetic nanoparticles coated with amino organic ligands and yam peel biomass. *Environ Nanotechnology, Monit Manag.* 2018;10:486-493. doi:10.1016/j.enmm.2018.10.001
 19. Jaramillo AO. *Bioingeniería de Aguas Residuales: Teoría y Diseño*. Acodal; 2005.
 20. Auge M. *AGUA FUENTE DE VIDA.*; 2007.

21. Ariffin M, Abu Hassan MA, Zainon Noor Z. *Coagulation and Flocculation Treatment of Wastewater in Textile Industry Using Chitosan Carbon Footprints Calculator for Malaysia Green Highway Index View Project Carbon Calculator for Malaysian Green Highway Index View Project.*; 2009. Accessed September 3, 2020. <https://www.researchgate.net/publication/228634338>
22. Latif Ahmad A, Syafii S, Boon Seng O. Removal of Dye From Wastewater of Textile Industry Using Membrane Technology Asymmetric synthesis of cardiovascular drug precursor (L-homophenylalanine) via integrated enzymatic membrane bioreactor View project polyethersulfone/Zinc oxide hollow fiber membrane View project. doi:10.11113/jt.v36.581
23. Raju GB, Karuppiah MT, Latha SS, Parvathy S, Prabhakar S. Treatment of wastewater from synthetic textile industry by electrocoagulation-electrooxidation. *Chem Eng J.* 2008;144(1):51-58. doi:10.1016/j.cej.2008.01.008
24. Abid MF, Zablouk MA, Abid-Alameer AM. Experimental study of dye removal from industrial wastewater by membrane technologies of reverse osmosis and nanofiltration. *Iran J Environ Heal Sci Eng.* 2012;9(17):1-9. doi:10.1186/1735-2746-9-17
25. Marimon Bolivar W. *Ingeniería de Nanopartículas Magnéticas Para La Remoción de Metales Pesados En Aguas.*
26. Nanotecnología una alternativa para el tratamiento de aguas residuales: Avances, Ventajas y Desventajas. Accessed September 3, 2020. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2072-92942018000100005
27. Jain N, Basniwal RK, Suman, Srivastava AK, Jain VK. Reusable nanomaterial and plant biomass composites for the removal of Methylene Blue from water. *Environ Technol.* 2010;31(7):755-760. doi:10.1080/09593331003621565
28. Tural B, Ertaş E, Enez B, Fincan SA, Tural S. Preparation and characterization of a novel magnetic biosorbent functionalized with biomass of *Bacillus Subtilis*: Kinetic and isotherm studies of biosorption processes in the removal of Methylene Blue. *J Environ Chem Eng.* 2017;5(5):4795-4802. doi:10.1016/j.jece.2017.09.019
29. Sharma S, Hasan A, Kumar N, Pandey LM. Removal of methylene blue dye from aqueous solution using immobilized *Agrobacterium fabrum* biomass along with iron oxide nanoparticles as biosorbent. *Environ Sci Pollut Res.* 2018;25(22):21605-21615. doi:10.1007/s11356-018-2280-z
30. Howard Perlman. *La Ciencia del Agua para Escuelas: Calidad del Agua.*

- Published 2017. Accessed May 5, 2020. <https://water.usgs.gov/gotita/waterquality.html>
31. Calidad del agua en Nuevo Laredo, ejemplo de esfuerzo y dedicación. | iAgua. Accessed May 5, 2020. <https://www.iagua.es/blogs/luis-anda-valades/holanda-ejemplo-gestion-sustentable-agua>
 32. Saneamiento Ambiental - Irene Campos Gómez - Google Libros. Accessed September 10, 2020. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=lsgrGBGIGeMC&oi=fnd&pg=PA1&dq=GÓMEZ,+I.C.,+2000.+Saneamiento+Ambiental.+EUNED.+&ots=E0lbpFIhsY&sig=JeBQ4chHoHKJununfICpn0805Mo#v=onepage&q&f=false>
 33. Contaminantes orgánicos persistentes (COP). Departamento de Territorio y Sostenibilidad. Accessed May 21, 2021. http://mediambient.gencat.cat/es/05_ambits_dactuacio/empresa_i_produccio_sostenible/substancias_quimiques/contaminants_organics_persistentes_cop/
 34. Contaminantes Orgánicos Persistentes: COP. Accessed May 21, 2021. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/productos-quimicos/contaminantes-organicos-persistentes-cop/>
 35. ▷ Contaminación del agua explicada para niños de primaria. Accessed May 5, 2020. <https://infoeducacion.es/primaria/contaminacion-del-agua-ninos/>
 36. UNESCO Digital Library.
 37. UNESCO. Hecho 15: La contaminación del agua | Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. Published 2009. Accessed March 26, 2020. <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact-15-water-pollution/>.
 38. TIPOS DE CONTAMINANTES DEL AGUA - Blog de Educación Ambiental. Accessed September 10, 2020. <https://sites.google.com/site/blogdeeducacionambiental/tipos-de-contaminantes-de>
 39. De Souza AAU, Melo AR, Pessoa FLP, De Arruda Guelli Ulson De Souza SM. The modified water source diagram method applied to reuse of textile industry continuous washing water. *Resour Conserv Recycl.* 2010;54(12):1405-1411. doi:10.1016/j.resconrec.2010.06.001
 40. Uso y Tratamiento del Agua en la Industria Textil | Fluence. Accessed September 10, 2020. <https://www.fluencecorp.com/es/uso-de-agua-en->

industria-textil/

41. Contaminación de la industria textil – Central Cero. Accessed September 10, 2020. <https://centralcero.com/blogs/news/contaminacion-de-la-industria-textil>
42. residuales RR-G integral de tratamiento de aguas, 2002 undefined. Sistemas de tratamiento de aguas residuales. *academia.edu*. Accessed September 10, 2020. http://www.academia.edu/download/57123734/GESTION_INTEGRAL_DEL_TRATAMIENTO_AR.pdf
43. Tratamiento de aguas residuales: Elemento necesario en una economía circular. Accessed September 10, 2020. <https://blogs.worldbank.org/es/voices/tratamiento-de-aguas-residuales-elemento-necesario-en-una-economia-circular>
44. Kelly A. Reynolds. Tratamiento de Aguas Residuales en Latinoamérica Identificación del Problema. Published September 2002. Accessed September 10, 2020. https://cidta.usal.es/cursos/edar/modulos/edar/unidades/LIBROS/documentos_nuevos/DeLaLaveSepOct02.pdf
45. Etapas del proceso de tratamiento – Tratamiento de Aguas Residuales. Accessed September 10, 2020. <https://tratamientodeaguasresiduales.net/etapas-del-tratamiento-de-aguas-residuales/>
46. Valero SJ. *PROYECTO FIN DE CARRERA TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES CON MATERIA ORGÁNICA NO BIODEGRADABLE*.
47. Douglas M. Ruthven. *Principles of Adsorption And Adsorption Processes*.; 1984. Accessed September 10, 2020. <http://aevnmont.free.fr/SACH-BOOKS/Adsorption/Ruthven-Adsorption.pdf>
48. Adsorbentes no-convencionales, alternativas sustentables para el tratamiento de aguas residuales. doi:10.22395/rium.v16n31a3
49. Savage N, Diallo MS. Nanomaterials and water purification: Opportunities and challenges. In: *Journal of Nanoparticle Research*. Vol 7. Springer; 2005:331-342. doi:10.1007/s11051-005-7523-5
50. Vilela D, Parmar J, Zeng Y, Zhao Y, Sánchez S. Graphene-Based Microbots for Toxic Heavy Metal Removal and Recovery from Water. *Nano Lett*. 2016;16(4):2860-2866. doi:10.1021/acs.nanolett.6b00768

51. The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses - Rochelle M. Cornell, Udo Schwertmann - Google Libros. Accessed September 10, 2020. https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=dIMuE3_kIW4C&oi=fnd&pg=PA1&dq=R.M.+Cornell+%26+U.+Schwertmann,+The+Iron+Oxides:+Structure+Properties,+Reactions,+Occurrences,+and+Uses,+2nd+edition,+WileyVCH,+Germany,+2003.&ots=l0pTXhR-fK&sig=Y1KClhBf5NXe1DNhMNJidfPdSdY#v=onepage&q&f=false
52. Wan S, Huang J, Yan H, Liu K. Size-controlled preparation of magnetite nanoparticles in the presence of graft copolymers. *J Mater Chem.* 2006;16(3):298-303. doi:10.1039/b512605c
53. Kefeni KK, Mamba BB, Msagati TAM. Application of spinel ferrite nanoparticles in water and wastewater treatment: A review. *Sep Purif Technol.* 2017;188:399-422. doi:10.1016/j.seppur.2017.07.015
54. NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS PARA LA AUTODESTRUCCIÓN DE LAS CÉLULAS CANCERÍGENAS – informaticaaplicadaanablog. Accessed September 10, 2020. <https://informaticaaplicadaanablog.wordpress.com/2016/04/09/nanoparticulas-magneticas-para-la-autodestruccion-de-las-celulas-cancerigenas/>
55. Elías P, Martínez P. *BIOMASA RESIDUAL VEGETAL: TECNOLOGÍAS DE TRANSFORMACIÓN Y ESTADO ACTUAL.*
56. Fernández J. *Energía de La Biomasa.* Accessed September 10, 2020. <http://media1.webgarden.es/files/media1:4befe685c2de5.pdf.upl/E.Biomassa.pdf>
57. Carvajal M. *INVESTIGACIÓN SOBRE LA ABSORCIÓN DE CO₂ POR LOS CULTIVOS MÁS REPRESENTATIVOS.*
58. LINAREZ GARCÍA CRISTIAN GE, ANYI CAROLINA. *OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA DE FILTRACIÓN CON NANOMATERIALES PARA LA MEJORA DE LOS INDICES DE CALIDAD DEL AGUA.* .; 2019.
59. Carrillo Pacheco YM, Herrera Gutiérrez JS. *Remoción de Azul de Metileno de Cuerpos de Agua Utilizando Nanopartículas Magnéticas Fe₃O₄.*; 2019. Accessed October 13, 2020. <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/24229>
60. Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde. Published 2020. Accessed October 13, 2020. [https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/24962/1/Doc.trabajo de grado.pdf](https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/24962/1/Doc.trabajo%20de%20grado.pdf)

61. Introduccion a La Metodologia Experimental/ Introduction to Experimental ... - Carlos Gutierrez - Google Libros. Accessed September 24, 2020. https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=cq3qioykDggC&oi=fnd&pg=PA3&dq=que+es+una+metodologia+experimental&ots=o-UU9Nash7&sig=fwd-vaiyYYWIUgNc_XyUJCupt0w#v=onepage&q=que es una metodologia experimental&f=false
62. Yaseen DA, Scholz M. Treatment of synthetic textile wastewater containing dye mixtures with microcosms. *Environ Sci Pollut Res*. 2018;25(2):1980-1997. doi:10.1007/s11356-017-0633-7
63. Marimón-Bolívar W, González EE. Green synthesis with enhanced magnetization and life cycle assessment of Fe₃O₄ nanoparticles. *Environ Nanotechnology, Monit Manag*. 2018;9:58-66. doi:10.1016/j.enmm.2017.12.003
64. Herramienta de simulación de adsorción de lecho fijo FAST. Accessed May 16, 2021. <http://www.fast-software.de/index.html>
65. Las bombas peristálticas de pequeño caudal: Conócelas. Accessed May 16, 2021. <https://www.bombasboyser.com/Actualidad/Las-bombas-peristandaacute-Iticas-de-pequeandntilde-o-caudal--conandoacute-celas-17.html>
66. Mérida F, Chiu-Lam A, Bohórquez AC, et al. Optimization of synthesis and peptization steps to obtain iron oxide nanoparticles with high energy dissipation rates. *J Magn Magn Mater*. 2015;394:361-371. doi:10.1016/j.jmmm.2015.06.076
67. Sagrario Martínez Montemayor. MATERIALES MAGNETICOS PUROS, COMPUESTOS E HIBRIDOS. Published May 2006. Accessed May 5, 2021. [https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/93/1/Tesis doctorado Sagrario Montemayor.pdf](https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/93/1/Tesis%20doctorado%20Sagrario%20Montemayor.pdf)
68. X-ray Diffractometers | Malvern Panalytical. Accessed May 17, 2021. https://www.malvernpanalytical.com/en/products/category/x-ray-diffractometers?campaignid=1576603869&adgroupid=60692776205&creative=332585407873&keyword=%2Bxrd&matchtype=b&network=g&device=c&clid=CjwKCAjwqliFBhAHEiwANg9szup0MZQXbeDisaj7Kbd6_JkVgi5ufxfIAB4JXXslug1_LrGXWjal3RoCX-IQAvD_BwE
69. Noval VE, Puentes CO, Carriazo JG. Magnetita (Fe₃O₄): Uma estrutura inorgânica com múltiplas aplicações em catálise heterogénea. *Rev Colomb Quim*. 2017;46(1):42-59. doi:10.15446/REV.COLOMB.QUIM.V46N1.62831
70. FTIR Applications - CO. Accessed May 17, 2021.

[//www.thermofisher.com/ht/en/home/industrial/spectroscopy-elemental-isotope-analysis/spectroscopy-elemental-isotope-analysis-learning-center/molecular-spectroscopy-information/ftir-information/ftir-applications.html](https://www.thermofisher.com/ht/en/home/industrial/spectroscopy-elemental-isotope-analysis/spectroscopy-elemental-isotope-analysis-learning-center/molecular-spectroscopy-information/ftir-information/ftir-applications.html)


71. Canteri M, Renard C, ... CLB-C, 2019 undefined. ATR-FTIR spectroscopy to determine cell wall composition: application on a large diversity of fruits and vegetables. *Elsevier*. Accessed May 6, 2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861719301638>
72. IR Spectrum Table & Chart | Sigma-Aldrich. Accessed May 6, 2021. <https://www.sigmaaldrich.com/technical-documents/articles/biology/ir-spectrum-table.html>
73. Ghazanfari MR, Kashefi M, Jaafari MR. Investigation of stabilization mechanism and size controlling of Fe₃O₄ nanoparticles using anionic chelating agents. *Appl Surf Sci*. Published online March 2016. doi:10.1016/j.apsusc.2016.03.067
74. Zhang L, He R, Gu H-C. Oleic acid coating on the monodisperse magnetite nanoparticles. *Appl Surf Sci*. 2006;253(5):2611-2617. doi:10.1016/j.apsusc.2006.05.023
75. Quiceno M, Giraldo G, UGciencia RV-, 2014 undefined. *Caracterización Fisicoquímica Del Plátano (Musa Paradisiaca Sp. AAB, Simmonds) Para La Industrialización.*; 2014. Accessed May 7, 2021. <https://revistas.ugca.edu.co/index.php/ugciencia/article/view/313>
76. Zhu F. Composition, structure, physicochemical properties, and modifications of cassava starch. *Carbohydr Polym*. 2015;122:456-480. doi:10.1016/j.carbpol.2014.10.063
77. Albis Arrieta A, Llanos H, Jeffrey R;, Gil G, Daniela ;, Moreno G. Adsorción de azul de metileno utilizando cáscara de yuca (Manihot esculenta) modificada químicamente con ácido oxálico. *revistas.uis.edu.co*. doi:10.18273/revion.v31n2-2018007
78. Lavado Meza C, Sun Kou R, Castro Arroyo T. BIOSORCIÓN DEL COLORANTE AZUL DE METILENO USANDO LOS CLADODIOS DE LA TUNA (Opuntia ficus indica). *Rev la Soc Química del Perú*. 2020;86(3):231-245. doi:10.37761/rsqp.v86i3.297
79. Peres EC, Slaviero JC, Cunha AM, Hosseini-Bandegharai A, Dotto GL. Microwave synthesis of silica nanoparticles and its application for methylene blue adsorption. *J Environ Chem Eng*. 2018;6(1):649-659. doi:10.1016/j.jece.2017.12.062

80. Prieto García JO. *VARIEDAD ROXA ADSORPTION OF CADMIUM FROM AN AQUEOUS SOLUTION ON ACTIVATED COAL FROM BAGASSE OF SUGARCANE ROXA VARIETY*. Vol 47.; 2020.
81. Basu M, Guha A, Production LR-J of C, 2017 undefined. Adsorption of lead on cucumber peel. *Elsevier*. Accessed May 14, 2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617304638>
82. Ortiz-Martinez K, ... KG-M-CE, 2015 undefined. Transition metal modified mesoporous silica adsorbents with zero microporosity for the adsorption of contaminants of emerging concern (CECs) from aqueous. *Elsevier*. Accessed May 14, 2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894714015277>
83. Rivas CF, Núñez O, Longoria F, Gonzalez L. ISOTERMA DE LANGMUIR Y FREUNDLICH COMO MODELOS PARA LA ADSORCIÓN DE COMPONENTES DE ÁCIDO NUCLEICO SOBRE WO 3 LANGMUIR AND FREUNDLICH ISOTHERMS AS MODEL FOR THE ADSORPTION OF NUCLEIC ACID COMPONENTS ON WO 3. 2014;26:43-49.
84. Karagöz S, Tay T, Ucar S, Erdem M. Activated carbons from waste biomass by sulfuric acid activation and their use on methylene blue adsorption. *Bioresour Technol*. 2008;99(14):6214-6222. doi:10.1016/j.biortech.2007.12.019
85. Nethaji S, Sivasamy A, Mandal AB. Adsorption isotherms, kinetics and mechanism for the adsorption of cationic and anionic dyes onto carbonaceous particles prepared from Juglans regia shell biomass. *Int J Environ Sci Technol*. 2013;10(2):231-242. doi:10.1007/s13762-012-0112-0
86. Vilar VJP, Botelho CMS, Boaventura RAR. Methylene blue adsorption by algal biomass based materials: Biosorbents characterization and process behaviour. *J Hazard Mater*. 2007;147(1-2):120-132. doi:10.1016/j.jhazmat.2006.12.055
87. Yu J, Li B, Sun X, Yuan J, materials RC-J of hazardous, 2009 undefined. Polymer modified biomass of baker's yeast for enhancement adsorption of methylene blue, rhodamine B and basic magenta. *Elsevier*. Accessed May 14, 2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389409003677>
88. Baytar O, Şahin Ö, Saka C. Sequential application of microwave and conventional heating methods for preparation of activated carbon from biomass and its methylene blue adsorption. *Appl Therm Eng*. 2018;138:542-551. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.04.039
89. Hameed B, materials AA-J of hazardous, 2009 undefined. Batch adsorption

- of methylene blue from aqueous solution by garlic peel, an agricultural waste biomass. *Elsevier*. Accessed May 14, 2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389408012995>
90. Novais R, Carvalheiras J, ... DT-J of cleaner, 2019 undefined. Synthesis of porous biomass fly ash-based geopolymer spheres for efficient removal of methylene blue from wastewaters. *Elsevier*. Accessed May 15, 2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261833004X>
 91. Wang P, Cao M, Wang C, et al. Kinetics and thermodynamics of adsorption of methylene blue by a magnetic graphene-carbon nanotube composite. *Elsevier*. Accessed May 15, 2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433213020710>
 92. Ghaedi M, Heidarpour S, Kokhdan S, Technology RS-P, 2012 undefined. Comparison of silver and palladium nanoparticles loaded on activated carbon for efficient removal of methylene blue: Kinetic and isotherm study of removal process. *Elsevier*. Accessed May 15, 2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591012002616>
 93. Maruthapandi M, Kumar VB, Luong JHT, Gedanken A. Kinetics, Isotherm, and Thermodynamic Studies of Methylene Blue Adsorption on Polyaniline and Polypyrrole Macro-Nanoparticles Synthesized by C-Dot-Initiated Polymerization. *ACS Omega*. 2018;3(7):7196-7203. doi:10.1021/acsomega.8b00478
 94. Adaobi Igwegbe C, Ahmadi S, Adaobi IGWEGBE C. *Removal of Methylene Blue on Zinc Oxide Nanoparticles: Nonlinear and Linear Adsorption Isotherms and Kinetics Study*. Vol 38. Accessed May 15, 2021. <https://www.researchgate.net/publication/338502483>
 95. Igwegbe C, Mohmmadi L, Ahmadi S, MethodsX AR-, 2019 undefined. Modeling of adsorption of methylene blue dye on Ho-CaWO₄ nanoparticles using response surface methodology (RSM) and artificial neural network (ANN). *Elsevier*. Accessed May 15, 2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215016119301918>
 96. Ruthiraan M, Abdullah EC, Mubarak NM, Nizamuddin S. Adsorptive removal of methylene blue using magnetic biochar derived from agricultural waste biomass: Equilibrium, isotherm, kinetic study. *Int J Nanosci*. 2018;17(5). doi:10.1142/S0219581X18500023
 97. Li Y, Zimmerman AR, He F, et al. Solvent-free synthesis of magnetic biochar and activated carbon through ball-mill extrusion with Fe₃O₄ nanoparticles for enhancing adsorption of methylene blue. *Sci Total Environ*. 2020;722:137972. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.137972

98. Sperlich A, Schimmelpfennig S, Baumgarten B, et al. Predicting anion breakthrough in granular ferric hydroxide (GFH) adsorption filters. *Water Res.* 2008;42(8-9):2073-2082. doi:10.1016/j.watres.2007.12.019
99. Autónoma U, Occidente DE, De F, et al. *DISEÑO DEL PLAN DE GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA INDUSTRIA TEXTIL ARITEX DE COLOMBIA S.A.* VERÓNICA BENAVIDES RIVERA *Pasantía Institucional Para Optar Al Título de Ingeniero Ambiental Directora* NANCY VÁSQUEZ SARRIA *Ingeniera Sanitaria Magíster En Ingeniería.*; 2015.
100. (No Title). Accessed May 17, 2021. https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf
101. Murty BS, Shankar P, Raj B, Rath BB, Murday J. *Textbook of Nanoscience and Nanotechnology.* Springer Berlin Heidelberg; 2013. doi:10.1007/978-3-642-28030-6

16.ANEXOS

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA LABORATORIOS	FORMATO DE SOLICITUD Y PROGRAMACIÓN DE TIEMPO DE LABORATORIO DEDICADO A PRÁCTICA NO ASISTIDA (LIBRE)	F 053 LI 103 02
---	---	-----------------

Proyecto de investigación
 REMOCIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS PERSISTENTES Y MERCURIO EN AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL POR MEDIO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS (MNPs) Y BIOMASA RESIDUAL DE PLÁTANO

IDENTIFICACIÓN DE LOS SOLICITANTES DE TIEMPO DE LABORATORIO:			
CÓDIGO	NOMBRES Y APELLIDOS	E-MAIL @ucatolica.edu.co	TELÉFONO
507344	Diego Alejandro Ruiz Piraquive	daruiz44@ucatolica.edu.co	3123574860
507240	Diego Felipe Monroy Pedraza	dfmonroy40@ucatolica.edu.co	3142806571

PROGRAMACIÓN DE ACTIVIDAD(ES) POR TIEMPO DE LABORATORIO SOLICITADO:								
ID	HORARIO IDEAL			HORARIO OPCIONAL			ESPACIO SOLICITADO (2) (A-B-C-D-E)	ENSAYO(S) A REALIZAR EN CADA LAPSO
	FECHA (dd/mm/AA)	HORA INICIO (1) (HH:MM)	HORA FIN (1) (HH:MM)	FECHA (dd/mm/AA)	HORA INICIO (1) (HH:MM)	HORA FIN (1) (HH:MM)		
1	23/01/2021	9:00 AM	11:00AM	29/01/2021	2:00PM	4:00PM	D	Color
2	30/01/2021	9:00 AM	11:00AM	5/01/2021	2:00PM	4:00PM	D	Olor
3	6/02/2021	9:00 AM	11:00AM	12/02/2021	2:00PM	4:00PM	D	Dureza total
4	13/02/2021	9:00 AM	11:00AM	19/02/2021	2:00PM	4:00PM	D	Conductividad
5	20/02/2021	9:00 AM	11:00AM	26/02/2021	2:00PM	4:00PM	D	Acidez total
6	27/02/2021	9:00 AM	11:00AM	5/02/2021	2:00PM	4:00PM	D	Alcalinidad total
7	6/03/2021	9:00 AM	11:00AM	12/03/2021	2:00PM	4:00PM	D	Magnesio (Mg)
8	13/03/2021	9:00 AM	11:00AM	19/03/2021	2:00PM	4:00PM	D	Mercurio (Hg)

(1) Cada lapso solicitado será máximo de 2 HORAS por día. Por favor, asistir con puntualidad para mayor optimización del tiempo.

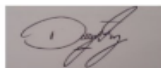
(2) **A)** Mecánica de suelos. **B)** Concretos. **C)** Mecánica de Sólidos. **D)** Análisis de agua. **E)** Hidráulica

MATERIALES /EQUIPOS/ INSUMOS A USAR	UND.	CANT.	A CARGO:	
			LAB	USU
Cascara de Plátano	g	300		X
Reactor foto catalítico con lámpara UV de mercurio capacidad de un litro		1	X	
Tapabocas		2		X
Papel filtro		5	X	
Agitador mecánico		1	X	
Reactor con capacidad de un litro		1	X	
Horno		1	X	
Espectrómetro		1	X	
Guantes		2		X

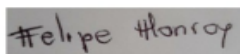
OBSERVACIONES

Entiendo que debo diligenciar completamente esta solicitud y que su aprobación me obliga a cumplir a cabalidad con el "Reglamento de los laboratorios" de la FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA y a acatar las órdenes que se impartan por parte del personal docente y administrativo. Los elementos de protección personal serán de mi propiedad. También me comprometo con el uso eficiente del horario asignado: asistir, informar la no asistencia (por lo menos con un día hábil de anticipación).

FIRMAS



SOLICITANT
E 1



SOLICITANTE 2

SOLICITANT
E 3



DOCENTE / TUTOR ENCARGADO

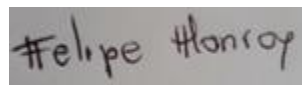
COORDINADOR DE



Firma de los estudiantes 1

Diego Alejandro Ruiz Piraquive

Código: 507344



Firma de los estudiantes 2

Diego Felipe Monroy Pedraza

Código: 507240



Firma del asesor del trabajo de grado
Ing. Wilfredo Marimon Bolívar Ph