




COMBINACIÓN DE OZONO Y NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS VERDES
PARA LA DEGRADACIÓN DE AZUL DE METILENO EN AGUA RESIDUAL
SINTÉTICA TEXTIL.

PRESENTADO POR:

YESICA LILIANA RAMÍREZ SALAZAR
LIZETH NATALIA VALERO MELO

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2021

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez <u>CÓDIGO: 507899</u> Natalia Valero <u>CÓDIGO: 507379</u>
		DIRECTOR: <u>PhD. WILFREDO MARIMON BOLIVAR.</u> Directortrabajo de grado

COMBINACIÓN DE OZONO Y NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS VERDES PARA LA DEGRADACIÓN DE AZUL DE METILENO EN AGUA RESIDUAL SINTÉTICA TEXTIL

ELABORADO POR:

YESICA LILIANA RAMÍREZ SALAZAR CÓDIGO: 507899
LIZETH NATALIA VALERO MELO CÓDIGO: 507379

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DIRECTOR
PhD. WILFREDO MARIMON BOLIVAR

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2021

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379
		DIRECTOR: Ph.D. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR, Directortrabajo de grado



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 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

La licenciante 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 licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

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](#).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>


 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez <u>CÓDIGO: 507899</u> Natalia Valero <u>CÓDIGO: 507379</u>
		DIRECTOR: <u>Ph.D. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR,</u> Directortrabajo de grado

Nota de Aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C. 2021

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez <u>CÓDIGO: 507899</u> Natalia Valero <u>CÓDIGO: 507379</u>
		DIRECTOR: <u>PhD. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR.</u> Directortrabajo de grado


AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecemos a Dios por concedernos entendimiento y sabiduría para culminar este trabajo de grado que hizo parte del proceso educativo que nos formó como ingenieras civiles.

A la Universidad Católica de Colombia por el constante acompañamiento y aporte en nuestra formación como profesionales, así mismo, por su esfuerzo para solicitar una alternancia en pro a los estudiantes que necesitábamos el uso de los laboratorios.

Al PhD. Wilfredo Marimón Bolívar por su apoyo y motivación en la búsqueda del conocimiento científico, así como, el aporte de su experiencia para el desarrollo de la presente tesis.

Al laboratorista Javier Mendoza por su presencia y enseñanza en cada práctica de laboratorio.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez <u>CÓDIGO: 507899</u> Natalia Valero <u>CÓDIGO: 507379</u>
		DIRECTOR: <u>PhD. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR.</u> Directortrabajo de grado

DEDICATORIA

Toda acción humana resulta honrada, agraciada y verdaderamente magnífica cuando se hace considerando las cosas que están por venir. En consecuencia, cuando construyamos, hagámoslo pensando que será para siempre. No edifiquemos para el provecho y el uso actual solamente. Hagamos tales obras que nuestros descendientes nos lo agradezcan y consideremos, a medida que ponemos piedra sobre piedra, que día llegara en que estas piedras serán sagradas porque nuestras manos las tocaron, y que la posteridad pueda decir con orgullo, al ver nuestra labor y la esencia que en ella forjamos:” Mirad aquí el legado de los que nos precedieron” Ruskin, John

Dedico este logro primeramente a Dios por permitirme culminar esta carrera. A mis padres Salvador Valero y María Del Carmen Melo, quienes me apoyaron desde el momento que decidí enfocarme en este camino de la ingeniería y que con mucho esfuerzo lograron que yo cumpliera este sueño. A mi hermano Danilo quien siempre ha sido mi compañero y mi mano derecha desde que tengo memoria. A mi hermanito Sebas, quien, con su condición especial, fue mi mayor motivación en los momentos más difíciles de la carrera. A mi novio, Gabriel, quien, con paciencia estuvo presente en muchos desafíos que tuve que afrontar. A mis amigos y demás personas que conocí en la universidad e hicieron parte de este camino como profesional. Y para finalizar, a todos mis familiares, que siempre han estado presentes en cada paso que doy, los amo.

-Lizeth Natalia Valero Melo

Le dedico este logro a Dios porque toda la vida ha puesto a las personas indicadas en mi camino; comenzando por mis padres Henry Ramirez y Liliana Salazar que cada día se esfuerzan y luchan por mi crecimiento personal, seguido de mis hermanos que me brindan su apoyo y ánimo cuando las cosas van difícil, así como mi familia que comparte mis alegrías como si fueran propias. Por permitir que mi maestra Amanda Moreno fuera mi guía espiritual y académica, por mis amigos y compañeros que han hecho este proceso divertido, enriquecedor e interesante. Y, por forjar mi resiliencia el día que dije hasta siempre a mi hermano Diego Salazar.

-Yesica Liliana Ramirez Salazar


 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379 DIRECTOR: PhD. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR, Directortrabajo de grado
--	--	--

CONTENIDO

RESUMEN	13
1. INTRODUCCIÓN	14
2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	15
3. JUSTIFICACIÓN	17
4. OBJETIVOS	19
4.1. OBJETIVO GENERAL	19
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
5. ESTADO DEL ARTE	20
6. ANTECEDENTES	22
7. MARCO REFERENCIA	23
7.1. MARCO TEÓRICO	23
7.1.1. AGUA	23
7.1.2. CONTAMINACIÓN DEL AGUA	26
7.1.3. TRATAMIENTOS PARA DESCONTAMINAR EL AGUA	29
7.2. MARCO CONCEPTUAL	36
9.3. MARCO LEGAL	37
8. ALCANCE Y LIMITACIONES	42
8.1. ALCANCE	42
8.2. LIMITACIONES	42
9. METODOLOGÍA	43
9.1. PROCEDIMIENTO	43
12.1.a. VARIABLES DEL EXPERIMENTO	44
12.2. CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA Y SÍNTESIS DE LAS NANOPARTÍCULAS	44
12.2.1. Producción de la muestra sintética: Composición de aguas residuales sintéticas (Erkan et al., 2020).	45
12.2.2. Síntesis de nanopartículas magnéticas verdes:	45
12.2.3. Caracterización de nanopartículas de magnetita (Fe ₃ O ₄):	45
12.2.4. Ozonizador con fuente de aire:	46


 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez <u>CÓDIGO: 507899</u> Natalia Valero <u>CÓDIGO: 507379</u> DIRECTOR: <u>PhD. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR,</u> Directortrabajo de grado
--	--	---

12.3. TRATAMIENTO DE OZONIZACIÓN	46
12.3.1. Oxidación con ozono	46
12.3.2. Ozonización catalítica:	46
12.4. CINÉTICA DE ADSORCIÓN	47
12.5. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN.....	48
10. RESULTADOS	49
10.1. Síntesis y caracterización de la magnetita	49
13.1.a. XRD Análisis	49
13.1.b. Propiedades Magnéticas	50
13.1.c. FTIR	52
10.2. Preparación de agua residual sintética.....	53
10.3. Ensayos de adsorción	54
13.3.a. Efecto del ph	54
13.3.b. Cinética de adsorción	56
13.3.c. Isotermas de adsorción	58
10.4. Porcentaje de remoción.....	61
10.5. Cálculos de aplicación a escala en aguas residuales para adsorber azul de metileno.....	63
10.6. Costo a gran escala de 1 gramo de adsorbentes para la remoción de azul de metileno.....	64
CONCLUSIONES	65
RECOMENDACIONES.....	66
REFERENCIAS	67
ANEXOS	73

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez <u>CÓDIGO: 507899</u> Natalia Valero <u>CÓDIGO: 507379</u>
		DIRECTOR: <u>Ph.D. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR.</u> Directortrabajo de grado

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Normativa referente al reúso y vertimiento de aguas residuales.	37
Tabla 2. Criterio de calidad en uso industrial.	40
Tabla 3. Variables del experimento.	44
Tabla 4. Parámetros para estudio de calidad de agua.	44
Tabla 5. Muestra sintética.	45
Tabla 6. Datos curva de ilustración 1.	53
Tabla 7. Datos curva de ilustración 2.	54
Tabla 8. Datos variación pH.	55
Tabla 9. Concentración final.	56
Tabla 10. Parámetros de la cinética de adsorción de azul de metileno.	57
Tabla 11. Dosis de adsorbente, de autoras.	58
Tabla 12. Parámetros de la cinética de adsorción de azul de metileno.	60
Tabla 13. Máxima capacidad de adsorción de alguno adsorbentes de estudios previos sobre azul de metileno.	60
Tabla 14. Porcentaje de remoción diferentes condiciones.	62
Tabla 15. Costo a escala de un gramo de adsorbente.	64

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez <u>CÓDIGO: 507899</u> Natalia Valero <u>CÓDIGO: 507379</u> DIRECTOR: <u>Ph.D. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR.</u> Directortrabajo de grado
--	--	--

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1. Estimación de la distribución mundial del agua, porcentajes redondeados que no se suman a 100	25
Imagen 2. Ciclo del agua	26
Imagen 3. Acumulación por efecto de condensación de los COPs.....	27
Imagen 4. COPs que se deben eliminar, según el convenio de Estocolmo. Círculos: pesticidas, triángulos: químicos industriales, cuadrados: producción no intencionada.....	28
Imagen 5. Efectos de la contaminación en la salud.	29
Imagen 6. Clasificación cualitativa de procesos de tratamiento en función de su complejidad técnica.	30
Imagen 7. Proceso de oxidación avanzada.	31
Imagen 8. Proceso de oxidación avanzada más usados.	31
Imagen 9. Proceso de ozonización.	32
Imagen 10. Posibles aplicaciones de la ozonización en el tratamiento de aguas residuales y potables.	33
Imagen 11. Ozono en tratamiento de aguas.	33
Imagen 12. Centros activos en la superficie de la magnetita (Fe_3O_4).....	34
Imagen 13. Comparación de los tamaños de partículas.	35
Imagen 14. Marco conceptual.....	36
Imagen 15. Metodología.	43
Imagen 16. (a) sistema de ozonización catalítica; (b) Reactor fotocatalítico con lámpara UV de mercurio (HPK 125 W).	47
Imagen 17. Modelos cinéticos.....	47
Imagen 18. Ecuaciones de isothermas.....	48
Imagen 19. Frecuencias vibracionales para algunos enlaces.....	52

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez <u>CÓDIGO: 507899</u> Natalia Valero <u>CÓDIGO: 507379</u> DIRECTOR: <u>PhD. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR,</u> Directortrabajo de grado
--	--	---


LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Parámetros medidos en la calidad del agua.	23
Figura 2. 12 (doce) primeros compuestos bajo el Convenio de Estocolmo divididos en plaguicidas, productos químicos industriales y subproductos.	28
Figura 3. Tipos de tratamientos de aguas residuales.	30
Figura 4. Parámetros en la producción de ozono.	32
Figura 5. Foto del montaje para test de jarras	62
Figura 6. Test de Jarras con ozono, de	63

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379 DIRECTOR: PhD. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR, Directortrabajo de grado
--	--	--

LISTA DE ILUSTRACIONES


Ilustración 1. Síntesis de nanopartículas.	49
Ilustración 2. Difractograma de MNPs.	50
Ilustración 3. Difractograma Gisteína@MNPs	50
Ilustración 4. Curva de saturación magnética de MNPs.	51
Ilustración 5. Cys@MNPs bajo efecto de imán	51
Ilustración 6. Espectros FTIR de Cys@MNPs	52
Ilustración 7. Diferentes concentraciones de agua sintética residual y azul de metilo.	53
Ilustración 8. Curva calibración de azul de metileno	53
Ilustración 9. Curva calibración azul de metileno y agua residual.....	54
Ilustración 10. Diferente pH en agua residual sintética	55
Ilustración 11. Efecto del pH	55
Ilustración 12. Efecto de la concentración	56
Ilustración 13. Modelos de cinética de adsorción,.....	57
Ilustración 14. Dosis de adsorbente.....	58
Ilustración 15. Modelos de isothermas.....	59
Ilustración 16. Condiciones para remoción de azul de metileno	61
Ilustración 17. Remoción de AM con ozono y MNPs	61

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez <u>CÓDIGO: 507899</u> Natalia Valero <u>CÓDIGO: 507379</u>
		DIRECTOR: <u>Ph.D. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR.</u> Directortrabajo de grado

RESUMEN

Se usaron nanopartículas de magnetita verdes (**Cys@MNPs**) en un proceso de ozonización como método para la remoción del colorante azul de metileno proveniente agua residual sintética simulando agua proveniente de la industria textil, a fin de mitigar su impacto contaminante en las fuentes de agua potable, que no se remueve en plantas de tratamiento por su uso en grandes cantidades en la actividad industrial, provocando vertimientos que afectan ecosistemas directos (Ramos & Blanco, 2017).

La concentración inicial de solución fue de 2 mg/L con una capacidad máxima de adsorción de 0.008647751 mg/g dato que se obtuvo con la modelación lineal en la cinética de adsorción e isothermas; comprobando la influencia del pH (entre 5-10) de la concentración, y del tiempo de agitación. El modelo que mejor se ajustó en el primer caso fue el de pseudo segundo orden con una constante de velocidad de $0.027 \text{ g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ y capacidad de adsorción q_e igual a 0.033 mg/g. En el segundo caso, se usaron las ecuaciones de Langmuir, Freundlich, Temkin, las cuales se ajustan satisfactoriamente gracias a su coeficiente de correlación mayor a 0.98, sin embargo, el modelo que mejor se ajusta para describir el equilibrio de adsorción es el de Temkin, con una constante de equilibrio K_0 de 0.5425.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez <u>CÓDIGO: 507899</u> Natalia Valero <u>CÓDIGO: 507379</u>
		DIRECTOR: <u>Ph.D. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR.</u> Directortrabajo de grado

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua debida a la industria textil es un problema que aumenta proporcional al crecimiento demográfico debido a que su consumo genera mayor demanda del uso del agua, ya sea para la producción y/o para su limpieza.


Dicha producción involucra el uso de agentes colorantes, químicos y auxiliares, complejos, de nivelación, reguladores de pH, aceleradores del teñido, entre otros. La acumulación de los residuos de estos agentes causa un daño directo a los ecosistemas, al efecto invernadero y, en especial a las fuentes hídricas (Cuando Cerón, 2013).

En esta última, es importante tomar medidas para controlar el vertimiento directo a los afluentes, así como, buscar alternativas para aminorar el impacto ambiental. Una alternativa que se ha desarrollado años anteriores es recuperar parte del agua que se ha contaminado por medio de procesos químicos.

De estos procesos químicos el más conocido es la oxidación avanzada, debido a que tiene la capacidad de remover contaminantes orgánicos de alto grado de persistencia, aunque es un proceso con cualidades de alta remoción y gama de ventajas, se limita en el uso industrial como tratamiento por sus altos costos.

Por esta razón es usado en la fase del pretratamiento del agua para dar continuidad al proceso biológico de remoción y, con ello, cumplir con los estándares establecidos (por la resolución 0631 de 2015) en la calidad de los vertimientos de agua, es decir, sus rangos de turbidez, color, pH, etc.

En esta investigación se estudió un mejoramiento de la oxidación avanzada por medio de la ozonización con el catalizador magnetita, donde se analizó el porcentaje de remoción del azul de metileno (AM) en una muestra sintética de agua residual textil.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379
		DIRECTOR: PhD. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR. Directortrabajo de grado

2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La distribución del agua en la tierra se puede clasificar en agua salada (97,5%) y en agua dulce (2.5%), en esta última, el porcentaje de agua superficial y en la atmósfera es el 0.4, del cual sólo el 1,6 % corresponde a ríos. El agua proveniente de ríos es fundamental en el hábitat humano puesto que, es la mayor fuente de consumo de agua potable. (Tolba, 1992)

El consumo de agua del ser humano ha generado tanto avances y desarrollo para la civilización como, modificaciones en el equilibrio de su ciclo puesto que la cantidad de agua usada supera a la que regresa a las fuentes hídricas en los procesos de evaporación y precipitación (Vilches et al., 2009). También, problemas ambientales producto del mal uso del recurso y la falta de su cuidado. El mayor de ellos hace referencia a la escasez y, según la ONU (Organización de las Naciones Unidas), sus mayores causas son la contaminación, la sequía y el uso descontrolado del agua. Debido a esto, las consecuencias perjudican tanto a seres humanos, como a los ecosistemas ya que ocasiona enfermedades, hambre, desaparición de especies vegetales y conflictos. (ACNUR Comité Español, 2019)

Los sectores de la industria han contribuido a la contaminación del agua mediante el uso de pesticidas, fertilizantes o compuestos orgánicos persistentes (COPs). Enfatizando, en la industria textil, se sabe que el algodón es materia prima en la elaboración de telas y para el proceso de cultivo de esta planta, se hace uso excesivo de agua, representando entre el 3% y 4% del líquido que se emplea en todo el mundo (Chico et al., 2014). Además, es el mayor consumidor de plaguicidas: 24% de insecticidas y 11% de pesticidas en el mundo, que dañan la tierra y el agua. (BBC Mundo, 2017).

Los (COPs) son sustancias químicas (a base de carbono) tóxicas producidas por el hombre para favorecer el desarrollo económico industrializado, tienen ciertas características que los diferencian de los otros contaminantes y que potencializan el difícil control tanto de su transporte como de su eliminación. (Bellabarda, 2011).

Tales características se refieren a la persistencia de la sustancia que tiene una vida media en el agua y en la tierra superior a dos y seis meses respectivamente, debida a su liposolubilidad y entre mayor número de átomos de cloro o bromo contenga mayor será su solubilidad en grasas, asimismo, los COPs organoclorados se degradan en sustancias más peligrosas y persistentes. (Tolba, 1992). Dicha persistencia, está acompañada de una bioacumulación y bioamplificación, es decir, son capaces de acumularse en los tejidos adiposos y aumentar sus concentraciones. (Bellabarda, 2011).

Estos compuestos cuentan con una alta dispersión que va desde los lugares más cálidos a los más fríos, puesto que son semi-volátiles y se evaporan lentamente.


 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez <u>CÓDIGO: 507899</u> Natalia Valero <u>CÓDIGO: 507379</u>
		DIRECTOR: <u>PhD. WILFREDO MARIMÓN BOLIVAR.</u> Directortrabajo de grado

Sus medios de transporte incluyen animales migratorios, corrientes marinas, sedimentos, personas, entre otros. Afectando así al entorno, a la salud de individuos y de animales. (Coordinación Regional de RAP-AL, 2018). Por ejemplo, mutagenicidad y carcinogenicidad, son disruptores endocrinos, manifestaciones en la piel, efectos en el sistema interno, efectos neurológicos, efectos psiquiátricos (Jiménez Ballesta, 2017).

Para la eliminación y control de los COPs existen varios procesos convencionales, como los que se usan en las plantas de tratamientos de agua residual (de tipo biológico), que puede ser de filtración por membranas o de oxidación avanzada. Ésta última, implica un cambio molecular para la generación de radicales hidroxilos que degraden el compuesto, para acelerar la creación de dichos radicales se hace uso de agentes oxidantes como el ozono, sales de hierro, catalizadores (como dióxido de titanio), H_2O_2 y radiación ultravioleta (Bes Monge et al., 2018).

En el caso de usar ozono, se puede realizar de forma no catalítica aumentando la concentración de peróxido de hidrógeno (H_2O_2), o, de forma catalítica usando sales de hierro (Remtavares, 2008).

Una de las soluciones para la carencia del recurso hídrico a nivel mundial es mitigar su contaminación y atacar directamente los COPs, usando sustancias con la capacidad enzimática de romper las moléculas para disolverlas en el agua y eliminarlas. Para ello se plantea: ¿en qué medida se degradan los contaminantes orgánicos persistentes implementando nanopartículas magnéticas con ozonización?

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379 DIRECTOR: Ph.D. WILFREDO MARIMÓN BOLIVAR, Directortrabajo de grado
--	--	---

3. JUSTIFICACIÓN

La descontaminación del agua es un proceso necesario para eliminar o mitigar la afectación tanto en los recursos hídricos, suelos, fuentes de alimentación, como en las condiciones de vida de muchos hogares pertenecientes a sociedades en las que la escasez del recurso afecta cerca de 1.200 millones de habitantes y, a 1.600 millones (una cuarta parte de la población mundial) porque no cuentan con infraestructura necesaria para la toma de agua de los ríos y acuíferos (ACNUR Comité Español, 2019)

En Colombia, 368.000 personas (13,6% de la población) están expuestas al consumo de agua contaminada por metales y compuestos orgánicos persistentes (COPs) que son en su mayoría xenobióticos. Los más abundantes son producto de la industria petrolera y textil, así como en la agricultura mediante el uso de plaguicidas e insecticidas (Fernandez & Suárez, 2020).

Para solucionar este problema se llevan a cabo procesos de filtración por membranas, fotocátalisis y de oxidación avanzada. Las dos primeras son ineficientes en muchas ocasiones porque tienen defectos como la polarización de membranas (ensuciamiento de la superficie), pérdida de permeabilidad, requerimiento de diafiltración (para mitigar el ensuciamiento), altos costos de las membranas, hinchamientos debidos a altas temperaturas lo que hace que las membranas no funcionen (Annuar et al., 2020)(Gabelman, 2017). Por su parte el proceso de fotocátalisis depende de la luz solar, una desventaja ya que no es útil en épocas de invierno o en lugares con escasez de radiación solar, además tiene rendimientos fotónicos bajos, y, en el caso de la heterogénea el costo aumenta debido a que es necesario eliminar las partículas de TiO_2 mediante filtraciones (Gomez, 2012).

Por esta razón, la oxidación avanzada y, específicamente la ozonización no fotoquímica es la más usada, puesto que es el proceso que presenta mayores ventajas, entre ellas la asequibilidad a los compuestos, la fácil remoción de los excesos de ozono, evita formación de lodos, colabora en el control de la turbidez y olor y, en comparación con los otros métodos es más económico (Bes Monge et al., 2018).


Teniendo en cuenta el proceso que se acaba de nombrar, en el presente proyecto se evaluó la eficiencia del uso del ozono y el catalizador magnetita, con la finalidad de generar una combinación entre las nanopartículas que aumente la extensión de la ozonización y con ello la optimización en tiempo y costos (Bes Monge et al., 2018).

El motivo por el cual se eligió la magnetita (Fe_3O_4) como un potencial catalizador fue por su abundancia en la corteza terrestre y efectividad en la síntesis orgánica ya que aporta sitios activos sin modificar la superficie, gracias a sus propiedades

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez <u>CÓDIGO: 507899</u> Natalia Valero <u>CÓDIGO: 507379</u>
		DIRECTOR: <u>PhD. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR.</u> Directortrabajo de grado

oxido-reductivas. Además, uno de sus mayores beneficios es su reutilización, debida al superparamagnetismo, que facilita la utilización de un campo magnético para recuperarla (Noval et al., 2016).

En ese orden de ideas, se desea aportar una solución a la contaminación y desperdicio del agua en las industrias, las cuales, son las principales responsables de la contaminación por COPs. Es decir, a mediano plazo se desea la utilización del proceso para que, a un largo plazo, se pueda comprobar y evaluar la mitigación de la escasez del agua en el mundo.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez <u>CÓDIGO: 507899</u> Natalia Valero <u>CÓDIGO: 507379</u> DIRECTOR: <u>PhD. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR,</u> Directortrabajo de grado
--	--	---


4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Establecer la eficiencia de la combinación de nanopartículas magnéticas verdes con ozono en la degradación de compuestos orgánicos persistentes en aguas residuales de la industria textil.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Preparar y analizar las características fisicoquímicas de la muestra de agua de estudio.
- Sintetizar y caracterizar las partículas magnéticas verdes.
- Evaluar la concentración final de compuestos orgánicos persistentes en ensayos de oxidación avanzada con ozono y nanopartículas magnéticas.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379
		DIRECTOR: Ph.D. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR. Directortrabajo de grado

5. ESTADO DEL ARTE


En Colombia, 6,2 millones de personas están expuestas a agua de alto riesgo para la salud y en el mundo, 2.000 millones de seres humanos carecen de dicho insumo en condiciones seguras. Según La Organización de las Naciones Unidas (ONU) aproximadamente 800.000 personas mueren anualmente debido a falta de agua potable (Fernandez & Suárez, 2020).

El problema mundial del agua se ha potencializado desde el desequilibrio que generó la revolución industrial, debido a que la población empezó a generar residuos con una velocidad mayor a la de descontaminación. Por ejemplo, en la industria textil se utilizaron máquinas de vapor donde el requerimiento del recurso aumentó, así como su contaminación debida a la producción, ya que se empezaron a generar compuestos orgánicos persistentes (COPs).

A lo largo del tiempo, se ha comprobado que dichos compuestos impactan a la salubridad y al entorno, por ello, se han estudiado con mayor frecuencia para determinar su nivel de toxicidad. Generando así la consciencia sobre su uso desmesurado y buscando alternativas para mitigarlos, producto de ello se identifica una primera fase de solución donde se crea el Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes (COP). Allí, prohíben el uso de 12 COPs en más de 120 países, quienes debían adaptar un plan nacional de aplicación.

Una de las propuestas fue degradar los COPs por medio de procesos convencionales como los biológicos, la adsorción con carbón activo, la oxidación térmica, la cloración, la floculación-precipitación, la ósmosis inversa, etc (Rodríguez, 2018). Estos, no siempre son suficientes para cumplir con los estándares deseados, por lo cual se usa como alternativa un proceso de oxidación avanzada.


En la actualidad, se ha comprobado la eficiencia del uso de ozonización, por ejemplo, en el año 2008 se aplicaron proceso de oxidación avanzada (Fotocatálisis solar) para el tratamiento y reutilización de efluentes textiles, donde se estudió el tratamiento de vertidos de tintura por desgaste de tejidos de algodón con colorantes, mediante fotocátalisis solar, heterogénea con dióxido de titanio y foto-Fenton. La fotocátalisis heterogénea con TiO_2 fue eficaz en el método de baños residuales de colorantes con cromóforo azo y antraquinona, logrando altas pérdidas de color y, potencializando el reusó de los baños procesados en nuevas tinturas. Pero, dichos colorantes necesitan métodos con mayor energía, como foto-fenton. Los vertidos analizados se usaron para obtener segundas tinturas por desgaste de los tejidos de algodón los cuales se usaron una tercera vez. Después de cotejar los resultados se reafirmó que los tratamientos foto-Fenton suministran baños que se pueden reutilizar en siguientes tinturas, sin importar el cromóforo de colorantes (Clemente, 2008).

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez <u>CÓDIGO: 507899</u> Natalia Valero <u>CÓDIGO: 507379</u>
		DIRECTOR: <u>PhD. WILFREDO MARIMON BOLIVAR.</u> Directortrabajo de grado

En continuidad a la línea de tiempo, para el año 2010 se realizó ozonización de C_6H_6O en medio acuoso usando magnetita como catalizador en sistemas ozono y ozono-radiación ultravioleta. En éste, se estudió el porcentaje de remoción de compuestos orgánicos (alquenos, fenoles y aminas) en una muestra de agua de una gasolinera, utilizando un catalizador ($Fe^{2+}Fe^{3+}_2O_4$) que mantuvo sus propiedades constantes a lo largo del tratamiento de ozonización heterogénea. Se evaluó el comportamiento del pH, concentración de catalizador y el tiempo en que reaccionó. Se concluyó que el tratamiento para aguas provenientes de una gasolinera es muy efectivo, así mismo, se identificaron algunos alquenos como: hexadecanos, octadecanos, dodecanos y acetatos. (Brito et al., 2010).

Tres años posteriores al estudio de Brito (Brito et al., 2010) los autores Castro y Herrera analizaron la efectividad de los procesos de oxidación avanzada para la degradación y decoloración de agua contaminada por colorante textil COLRON RED SD3B, en dónde, a través del diseño estadístico de experimentos de Taguchi, identificaron que las condiciones más óptimas se deben a un pH de 2, cantidades de colorante del 100 ppm, metal de 80 ppm y H_2O_2 de 102 ppm (Castro & Herrera, 2013). Otro método para la degradación del contaminante fue el que se usó en el año 2018 donde a través de ozonización de desechos líquidos textiles para remoción de SST, DQO, DBO y lípidos. Y, usando reactores batch con tiempos de reacción entre 10 y 60 min; se llevó a cabo el método de oxidación que concluyó que los niveles oxidativos fueron satisfactorios, especialmente en la DBO5, las Grasas y los aceites a los 50 minutos de reacción. Se oxidaron todos los parámetros que indican la contaminación, en el comportamiento polinómico de segundo grado, con coeficientes de correlación mayores a los 0,98 (Pérez et al., 2018).

Un estudio reciente que se publicó en el año 2020 sobre el uso de agua residual textil real (RTW), sin pretratamiento, sin fuentes de carbono adicionales y sin diluir, con el acoplamiento de una fotocatálisis mediante el uso de un composite sin precedentes para esta aplicación. Demostró que el método de descontaminación de aguas residuales analizado en el estudio, es una alternativa atractiva y es muy recomendable aplicar este sistema antes de la disposición de efluentes textiles en cuerpos de agua, ya que el RTW recolectado que contenía el colorante azo Direct Black 22, se trató con un consorcio bacteriano y después de 96 h se empleó el proceso de fotocatálisis secuencial utilizando ZnO /Polipirrol durante 60 min. El acoplamiento de ambos procesos de tratamiento dio como resultado una eficiencia de decoloración total de 95,7% y 99,8% de degradación del TOC. El análisis del producto de degradación se llevó a cabo mediante LC – MS / MS y se propone una ruta de degradación. (Ceretta et al., 2020).

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez <u>CÓDIGO: 507899</u> Natalia Valero <u>CÓDIGO: 507379</u>
		DIRECTOR: <u>Ph.D. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR.</u> Directortrabajo de grado


6. ANTECEDENTES

El grupo de investigación o Semillero Nanotechnology, viene trabajando estas tesis en la Universidad Católica de Colombia:

En la investigación titulada – Remoción de azul de metileno en el agua usando nanopartículas magnéticas– se plantea una solución a la contaminación del agua debida a las industrias textiles, la cual se hace antes del vertimiento del desecho, aprovechando el estancamiento del recurso y la suspensión del azul de metilo. Usando carbón activado modificado con las nanopartículas (Carrillo & Herrera, 2019).

En la investigación que implementan nanopartículas de arcilla modificada para la potabilización de agua del río Cuja– Se modificaron las nanopartículas de arcilla magnéticamente con el fin de evitar posibles contaminantes emergentes que se produzcan de forma repentina en un procedimiento convencional (Moreno & Romero, 2019).

En la investigación donde se diseña un método de tratamiento de aguas residuales que provienen de curtiembre, usando carbón activado modificado con nanopartículas magnéticamente- Con el objeto de determinar la proyección más económica y factible en la obtención de la calidad de agua óptima para su reutilización, implementan el software GPS-X 7.0 y varían los parámetros de entrada de los clarificadores y los aireadores. Posteriormente, se usa el software Fast 2.0 para establecer la eficiencia de la columna de adsorción para la remoción del contaminante usando carbón activado granular y en polvo, junto a carbón activado granular y en polvo modificados magnéticamente con las nanopartículas sintetizadas. Por último, hacen el diseño de la columna de absorción para este sistema de tratamiento (Angulo & Molina, 2020).

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379
		DIRECTOR: Ph.D. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR. Directortrabajo de grado

7. MARCO REFERENCIA

7.1. MARCO TEÓRICO

7.1.1. AGUA

- 7.1.1.1. Agua potable: Agua que se puede beber (entre muchos otros usos domésticos, industriales, alimenticios, recreativos, etc.) porque es segura y su calidad es libre portadora de enfermedades (WHO, 2019).
- 7.1.1.2. Agua residual: Agua que se ha usado para fines benéficos en la industria y en el ámbito doméstico, no sirve para un consumo directo así que requiere de tratamientos (Sierra, 2011) (sstp, 2018).
- 7.1.1.3. Calidad del agua: Se define tanto en condiciones físicas comprendidas por concentraciones, sustancias, características químicas, biológicas, orgánicas, entre otras. Como por el estado de la biota presente en el cuerpo del agua y su idoneidad para propósitos como nadar en ella o beberla (Sierra, 2011) (National Ocean Service, n.d.).


Figura 1. Parámetros medidos en la calidad del agua.



Fuente: (Sierra, 2011), por autoras, 2020.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379
		DIRECTOR: Ph.D. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR, Directortrabajo de grado

- 7.1.1.4. Demanda química de oxígeno (DQO): Son sistemas de medición que generalmente implican la oxidación total de la materia orgánica transportada por el agua y la medición concomitante del consumo de oxígeno para dicha oxidación. Es la estimación de oxígeno requerido para la porción de materia orgánica en las aguas residuales que está sujeta a oxidación y también la porción de O_2 usada por la materia orgánica de la solución de dicromato de potasio ácido hirviendo. La DQO es una medida para determinar la cantidad de sustancias biológicamente activas, la cantidad de bacterias, y también de materia orgánica biológicamente inactiva en el agua. Es una variable importante y de rápida medición para caracterizar cuerpos de agua, aguas residuales, desechos industriales y efluentes de plantas de tratamiento (Sarzamin & Jawad, 2018).
- 7.1.1.5. Demanda biológica de oxígeno (DBO): Representa la cantidad de oxígeno consumida por las bacterias y otros microorganismos mientras descomponen la materia orgánica en condiciones aeróbicas (hay oxígeno) a una temperatura específica. Ciertas tensiones ambientales (temperaturas cálidas de verano) y otros factores inducidos por el hombre (introducción de fertilizantes en exceso a un cuerpo de agua) disminuyen la porción de O_2 disuelto en el agua, lo que provoca estrés en la vida acuática local. Un análisis del agua que se utiliza para comprender mejor el efecto de las bacterias y otros microorganismos sobre la cantidad de oxígeno que consumen al descomponer la materia orgánica en condiciones aeróbicas (hay oxígeno) es una medición de la demanda bioquímica de O_2 (DBO).
- 7.1.1.6. Determinar cómo la materia orgánica afecta la concentración de oxígeno disuelto en un arroyo o lago es parte integral de la gestión de la calidad del agua. La DBO es una medición de la porción de O_2 necesaria para eliminar la materia orgánica de desecho del agua en el proceso de descomposición por las bacterias aeróbicas (aquellas bacterias que viven solo en un ambiente que contiene oxígeno). La materia orgánica residual se estabiliza o se vuelve inobjetable mediante su descomposición por organismos bacterianos vivos que necesitan oxígeno para realizar su trabajo. La DBO se utiliza, a menudo en las plantas de tratamiento de aguas residuales, como índice del grado de contaminación orgánica del agua (USGS, 2020).
- 7.1.1.7. Tipos agua: Se puede clasificar dependiendo de sus características fisicoquímicas o biológicas, así (Aquaefundación, 2020):

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379
		DIRECTOR: PhD. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR. Directortrabajo de grado

- Potable
- Dulce
- Salada
- Salobre
- Dura
- Blanda
- Destilada
- Residuales
- Negras:
- Grises
- Cruda o bruta

Imagen 1. Estimación de la distribución mundial del agua, porcentajes redondeados que no se suman a 100

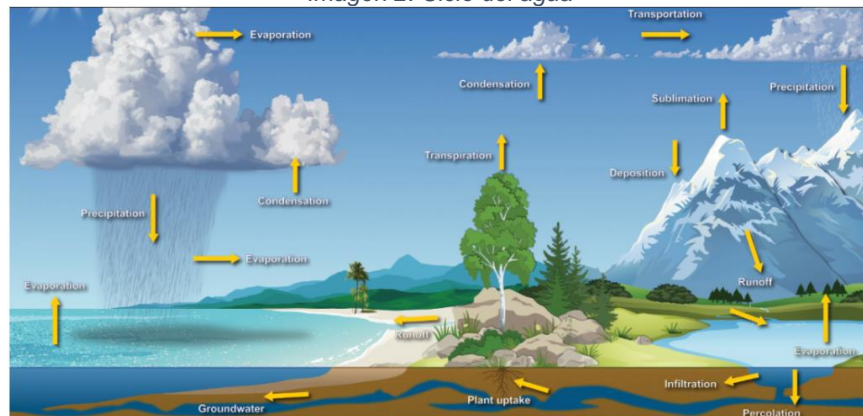
Fuente de agua	Volumen de agua, en millas cúbicas	Volumen de agua, en kilómetros cúbicos	Porcentaje de agua dulce	Porcentaje de agua total
Océanos, mares y bahías	321.000.000	1,338,000,000	-	96,54
Casquetes polares, glaciares y nieve permanente	5.773.000	24,064,000	68,7	1,74
Agua subterránea	5,614,000	23,400,000	-	1,69
<i>Fresco</i>	2.526.000	10,530,000	30,1	0,76
<i>Salina</i>	3,088,000	12,870,000	-	0,93
La humedad del suelo	3.959	16.500	0,05	0,001
Hielo molido y permafrost	71,970	300.000	0,86	0,022
Lagos	42,320	176,400	-	0,013
<i>Fresco</i>	21,830	91.000	0,26	0,007
<i>Salina</i>	20,490	85,400	-	0,006
Atmósfera	3,095	12,900	0,04	0,001
Agua de pantano	2,752	11,470	0,03	0,0008
Ríos	509	2,120	0,006	0,0002
Agua biológica	269	1,120	0,003	0,0001

Fuente: (Gleick, 1993).

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379
		DIRECTOR: Ph.D. WILFREDO MARIMON BOLIVAR. Directortrabajo de grado

- 7.1.1.8. Ciclo del agua: muestra el movimiento continuo del agua dentro de la Tierra y la atmósfera (transporte). El agua líquida se evapora, se condensa, forma nubes y se precipita de regreso en forma de lluvia y nieve. El agua líquida fluye a través de la tierra (escorrentía), hacia el suelo (infiltración y percolación) y a través del suelo (agua subterránea); la subterránea pasa a las plantas (absorción de las plantas) y se evapora de las plantas a la atmósfera (transpiración). El hielo sólido y la nieve pueden convertirse directamente en gas (sublimación). Lo contrario también puede suceder cuando el vapor de agua se solidifica (deposición) (NOAA, 2020).

Imagen 2. Ciclo del agua



Fuente: (NOAA, 2020)

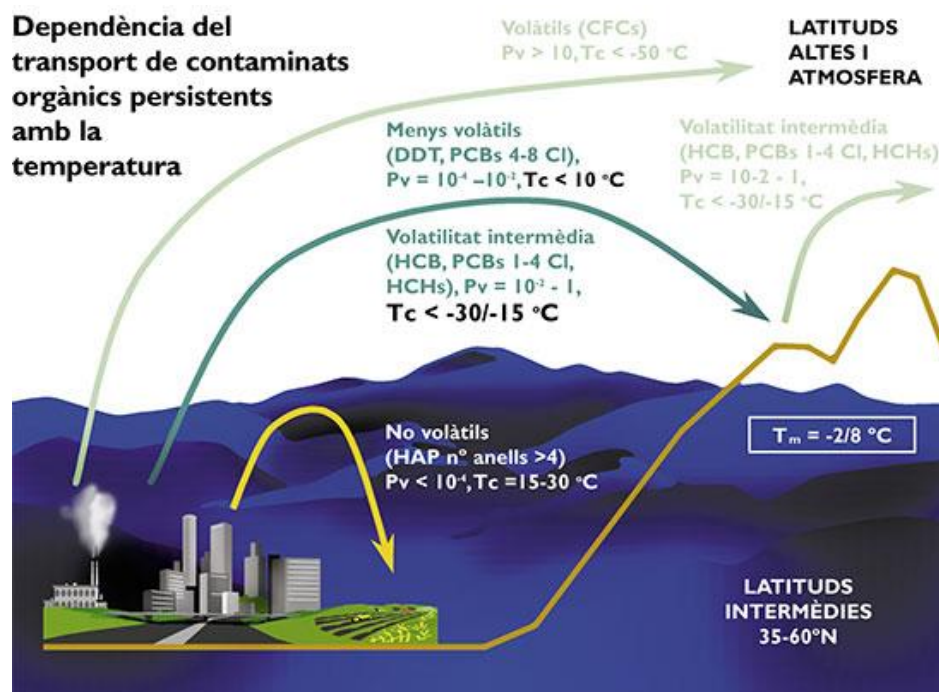
7.1.2. CONTAMINACIÓN DEL AGUA

Contaminación del agua: Ocurre cuando se transfieren sustancias nocivas a fuentes hídricas, degradando su calidad de agua y convirtiéndola tóxica tanto para humanos como para el medio ambiente (Denchak, 2018).

Industria textil: El teñido de textiles es el segundo mayor contaminante de agua en todo el mundo y la industria de la moda produce el 20 % de las aguas residuales del mundo. Cuando se trata de fabricar ropa y productos para el hogar, los fabricantes utilizan el agua de forma extensiva y las aguas residuales resultantes afectan negativamente al medio ambiente. Según un informe de 2019, el Banco Mundial afirmó que “algunos estudios han demostrado que la industria textil es responsable de aproximadamente una quinta parte de la contaminación mundial del agua. El uso del agua es una gran parte de la industria textil, se utiliza para procesos de enrollado, blanqueado y teñido. El aspecto de la contaminación proviene principalmente de las aguas residuales. Si esta agua contaminada no se trata antes de ser entregada al embalse, estas aguas residuales pueden reducir la

concentración de oxígeno, lo que puede ser perjudicial tanto para la vida acuática como para el ecosistema acuático en general (Rafiul, 2020).

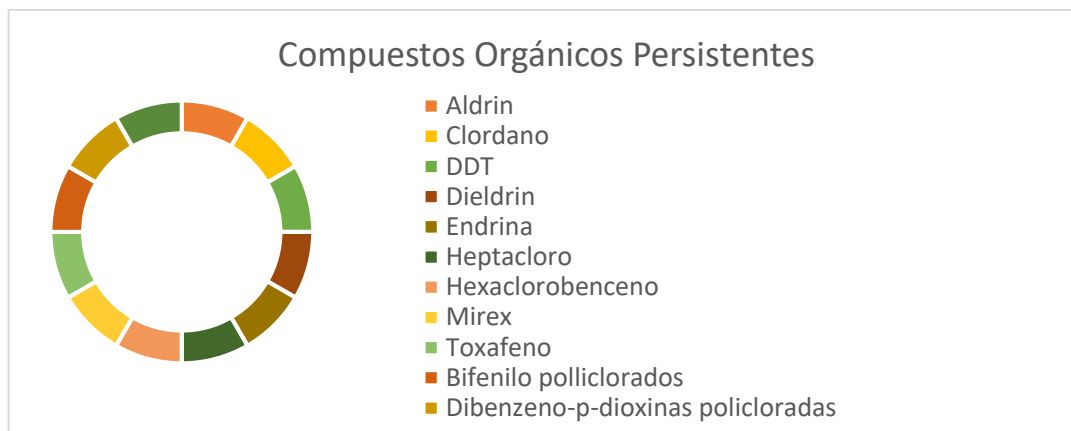
Imagen 3. Acumulación por efecto de condensación de los COPs.



Fuente: (Grimlat, 2013).

- 7.1.2.1. Convenio de Estocolmo: es un tratado global para proteger la salud humana y el medio ambiente de los productos químicos, fue adoptado por la Conferencia de Plenipotenciarios (Estocolmo, 22 de mayo de 2001) y entró en vigor el 17 de mayo de 2004. Consciente de que los contaminantes orgánicos persistentes (COP) plantean amenazas importantes y crecientes para la salud humana y el medio ambiente (UN environment programme, 2019).
- 7.1.2.2. Contaminantes orgánicos persistentes (COPs): Son sustancias químicas que tienen una base de carbono, generadas por el ser humano (en las industrias) con un alto grado de contaminación y difícil remoción, debido a sus características de transporte, persistencia en el medio ambiente, capacidad de bioamplificación y bioacumulación en ecosistemas. Lo que las hace tóxicas tanto para el ser humano como para la naturaleza (WHO, 2020).

Figura 2. 12 (doce) primeros compuestos bajo el Convenio de Estocolmo divididos en plaguicidas, productos químicos industriales y subproductos.



Fuente: Autoras, información: Stockholm Convention, 2019.

Imagen 4. COPs que se deben eliminar, según el convenio de Estocolmo. Círculos: pesticidas, triángulos: químicos industriales, cuadrados: producción no intencionada.

<u>Aldrin</u> ●	<u>Clordano</u> ●	<u>Clordecona</u> ●
<u>Éter de decabromodifenilo</u> (mezcla comercial, c-decaBDE) ▲	<u>Dicofol</u> ●	<u>Dieldrin</u> ●
<u>Endrina</u> ●	<u>Heptacloro</u> ●	
<u>Hexabromobifenilo</u> ▲	<u>Hexabromociclododecano (HBCDD)</u> ▲	<u>Éter de hexabromodifenilo y éter de heptabromodifenilo</u> ▲
<u>Hexaclorobenceno (HCB)</u> ●	<u>Hexaclorobutadieno</u> ▲	<u>Alfa hexaclorociclohexano</u> ●
<u>Beta hexaclorociclohexano</u> ●	<u>Lindano</u> ●	<u>Mirex</u> ●
<u>Pentaclorobenceno</u> ● ▲	<u>Pentaclorofenol y sus sales y ésteres</u> ●	<u>Bifenilos policlorados (PCB)</u> ▲
<u>Naftalenos policlorados</u> ▲	<u>Ácido perfluorooctanoico (PFOA), sus sales y compuestos relacionados con PFOA</u> ▲	<u>Parafinas cloradas de cadena corta (PCCC)</u> ▲
<u>Endosulfán técnico y sus isómeros relacionados</u> ●	<u>Éter de tetrabromodifenilo y éter de pentabromodifenilo</u> ▲	<u>Toxafeno</u> ●

Fuente: (UN environment programme, 2019).

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379 DIRECTOR: PhD. WILFREDO MARIMON BOLIVAR. Directortrabajo de grado
--	--	--

- 7.1.2.3. Efectos en la salud debida a los COPs: Los contaminantes orgánicos persistentes causan una variedad de efectos adversos para la salud, que incluyen cáncer, supresión del sistema inmunológico, disminución de la función cognitiva y neuroconductual, alteración de la función de los esteroides sexuales y la tiroides, y al menos algunos de ellos aumentan el riesgo de enfermedades crónicas, como la hipertensión. enfermedad cardiovascular y diabetes (Carpenter, 2011).

Imagen 5. Efectos de la contaminación en la salud.

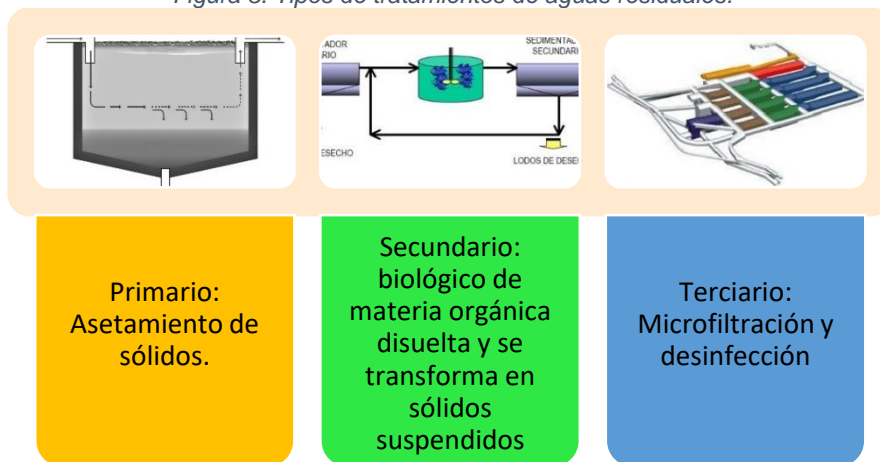


Fuente: (Ibañez, 2015).

7.1.3. TRATAMIENTOS PARA DESCONTAMINAR EL AGUA

- 7.1.3.1. Tratamiento de aguas residuales: Es un proceso químico, físico y/o biológico que se le realiza al agua para remover o eliminar todos los materiales contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos que se pueden encontrar suspendidos o disueltos (Noyola, Adalberto; Morgan, 2013).

Figura 3. Tipos de tratamientos de aguas residuales.



De autoras. Información Fuente: (Nathanson, 2020)

Imagen 6. Clasificación cualitativa de procesos de tratamiento en función de su complejidad técnica.

Categoría	Ejemplos de procesos de tratamiento
1	Cloración simple Filtración sencilla (rápida o lenta, en arena)
2	Precloración y filtración Aeración
3	Coagulación química Optimización de procesos para el control de los SPD
4	Tratamiento con carbón activado granular (CAG) Intercambio de iones
5	Ozonización
6	Procesos de oxidación avanzados Tratamiento con membranas

Fuente: (Organización Mundial de la Salud, 2006).

7.1.3.2. Proceso de oxidación avanzada (POA): Es el proceso dirigido por altas tecnologías investigadas para degradar las partículas orgánicas de difícil remoción (Belter et al., 2020).

Implica utilizar especies de oxígeno muy reactivas encargadas de destruir o modificar la estructura de los contaminantes, inician gracias a alguna fuente de energía externas como la energía eléctrica, la radiación ultravioleta (UV) o la luz solar (Mazille, 2020).

Los POA se aplican principalmente en el tratamiento terciario, teniendo como objeto suprimir compuestos de difícil biodegradación y hasta, aminorar la contaminación microbiológica (Bes Monge et al., 2018).

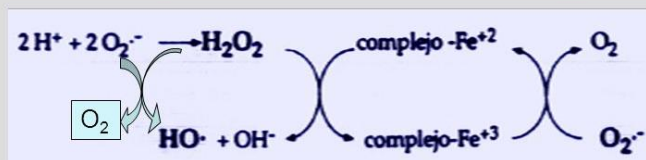
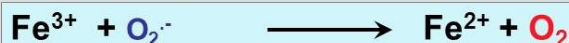
 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379
		DIRECTOR: PhD. WILFREDO MARIMON BOLIVAR. Directortrabajo de grado

Imagen 7. Proceso de oxidación avanzada.

- **Reacción de Haber-Weiss**



- **Reacción de Fenton**



Fuente: (Jimenez, 2016)

Imagen 8. Proceso de oxidación avanzada más usados.

Procesos no fotoquímicos	Procesos fotoquímicos
Ozonización	Ultravioleta de vacío
Ozonización con O_3 / H_2O_2	UV / H_2O_2
Procesos Fenton (Fe^{+2} / H_2O_2) y relacionados	UV / O_3
Oxidación electroquímica	UV / O_3 / H_2O_2
Radiólisis y tratamiento con haces de electrones	Fotocatálisis solar Homogénea: Foto-Fenton y relacionadas Heterogénea: Fotocatálisis con TiO_2
Plasma no térmico	
Oxidación en agua subcrítica y supercrítica	
Irradiaciones gamma	
Aceleradores de electrones	

Fuente: (Bes Monge et al., 2018)

7.1.3.3. Proceso de ozonización: Proceso de oxidación avanzada no fotoquímico que genera un conjunto de entidades moleculares muy reactivas, en especial el R-OH. Su eficacia depende de la contaminación que será procesada, el tiempo de contacto y de la cantidad de ozono, como se observa en la imagen 8 (Bes Monge et al., 2018).


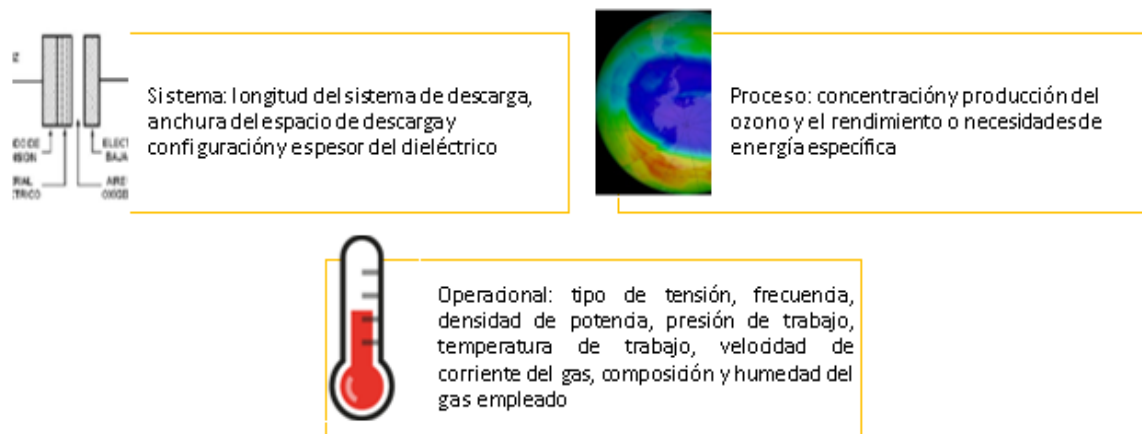
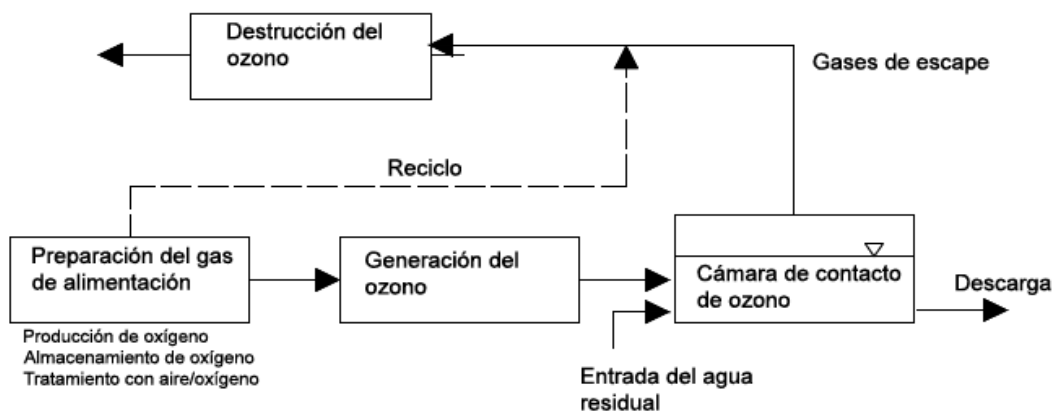
 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379
		DIRECTOR: PhD. WILFREDO MARIMÓN BOLIVAR. Directortrabajo de grado

Figura 4. Parámetros en la producción de ozono.



De autoras. Información Fuente: (Bes Monge et al., 2018)

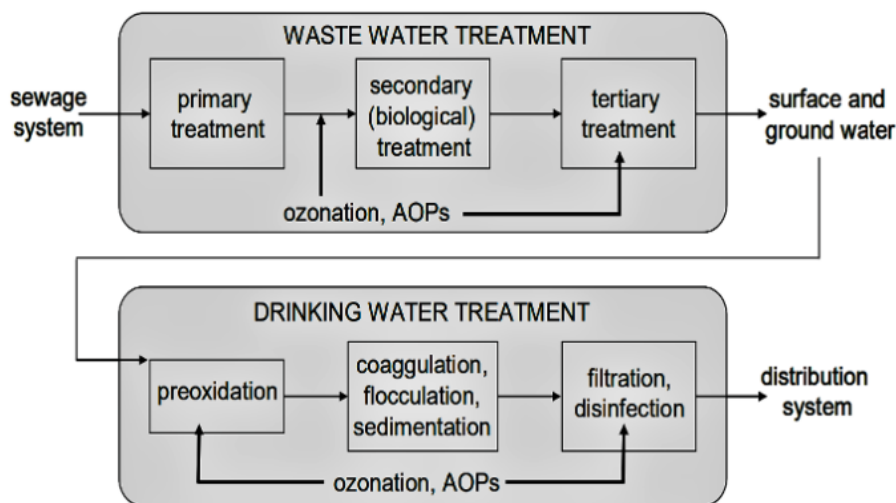
Imagen 9. Proceso de ozonización.



Fuente: (Bes Monge et al., 2018)

Es muy usado en el tratamiento de aguas residuales debido a su eficiencia, a que es amigable con el medio ambiente y a su manejo. Para la producción del ozono se elige entre la descarga de corona, la descarga electroquímica y los métodos UV, donde es obtenido por descarga eléctrica alterna de alta tensión. Seguido a ello, se garantiza el contacto del ozono con el agua usando la dirección del flujo (puede ser con difusores) contenida en una cámara de contacto. Y, finalmente, se elimina, se reutiliza o se remueve el exceso de ozono (Bes Monge et al., 2018).

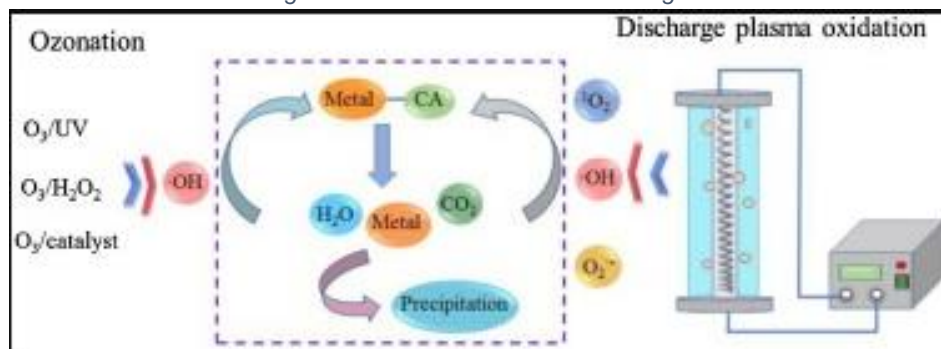
Imagen 10. Posibles aplicaciones de la ozonización en el tratamiento de aguas residuales y potables.



Fuente: (Mazille, 2020).

- 7.1.3.4. Ozono (O_3): Es un gas con alto potencial de oxidación (2,07 V) que puede reaccionar directamente con compuestos orgánicos o indirectamente con compuestos orgánicos mediante la generación del radical OH. Se usa en el tratamiento de aguas para destruir compuestos y metales pesados (Du & Zhang, 2020).


Imagen 11. Ozono en tratamiento de aguas.



Fuente: (Du & Zhang, 2020)

- 7.1.3.5. Magnetita (Fe_3O_4): Es un mineral de color negro que puede actuar como imán natural, tiene estructura de octaedro y se encuentra en gran proporción en la superficie de la tierra. Pertenece al grupo de la espinela, es decir, hace parte de los óxidos (Nacho, 2016).

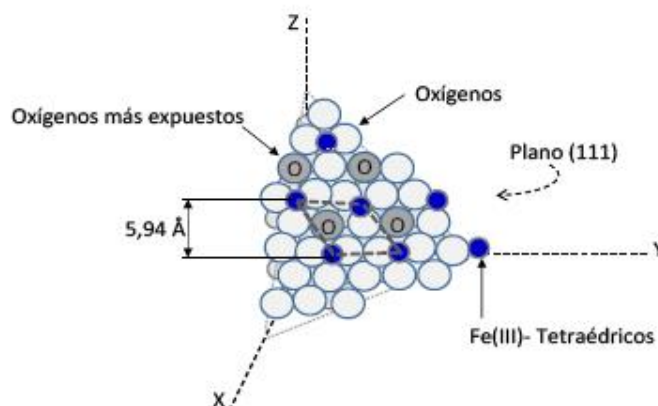
La magnetita es un catalizador o soporte catalítico, un material inorgánico con una estructura de espinela inversa ($FeFe_2O_4$), en el desarrollo de un número importante de reacciones químicas. Este

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379
		DIRECTOR: PhD. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR, Directortrabajo de grado

óxido de hierro se ha estudiado en diversas reacciones: catalizador másico, soporte catalítico de metales y de óxidos metálicos, núcleo de catalizadores tipo core-shell, o modificado mediante el anclaje de organocatalizadores y complejos metálicos (Noval et al., 2016).

Químicamente la magnetita, Fe_3O_4 (o también FeFe_2O_4), es un óxido mixto de hierro; su composición corresponde a 27,6% de oxígeno y 72,4% de hierro. Cristaliza en un sistema cúbico centrado en las caras (FCC de oxígenos, $a = 8,40 \text{ \AA}$). Su relación estequiométrica de cationes puede expresarse en la forma $\text{Fe}_3^+(\text{Fe}_2^+.\text{Fe}_3^+)\text{O}_4$, con un grupo espacial $\text{Fd}3\text{m}$. En su celda unitaria de 56 átomos, 32 son de oxígeno y 24 son cationes de hierro, de los cuales 16 están en forma férrica (Fe^{3+}) y 8 en forma ferrosa (Fe^{2+}). Los átomos de oxígeno forman una celda unitaria cúbica centrada en las caras y los cationes de hierro están alojados en los espacios intersticiales; las posiciones tetraédricas corresponden específicamente a cationes Fe^{3+} y en las posiciones octaédricas se alojan cationes Fe^{3+} y Fe^{2+} por igual (Noval et al., 2016).

Imagen 12. Centros activos en la superficie de la magnetita (Fe_3O_4).



Fuente: (Noval et al., 2016).

- 7.1.3.6. Nanopartículas: Son partículas de tamaño muy pequeño que varía entre 1-100 nanómetros por lo que es invisible ante el ojo humano (TWI, 2020).


 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379
		DIRECTOR: PhD. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR, Directortrabajo de grado

Imagen 13. Comparación de los tamaños de partículas.

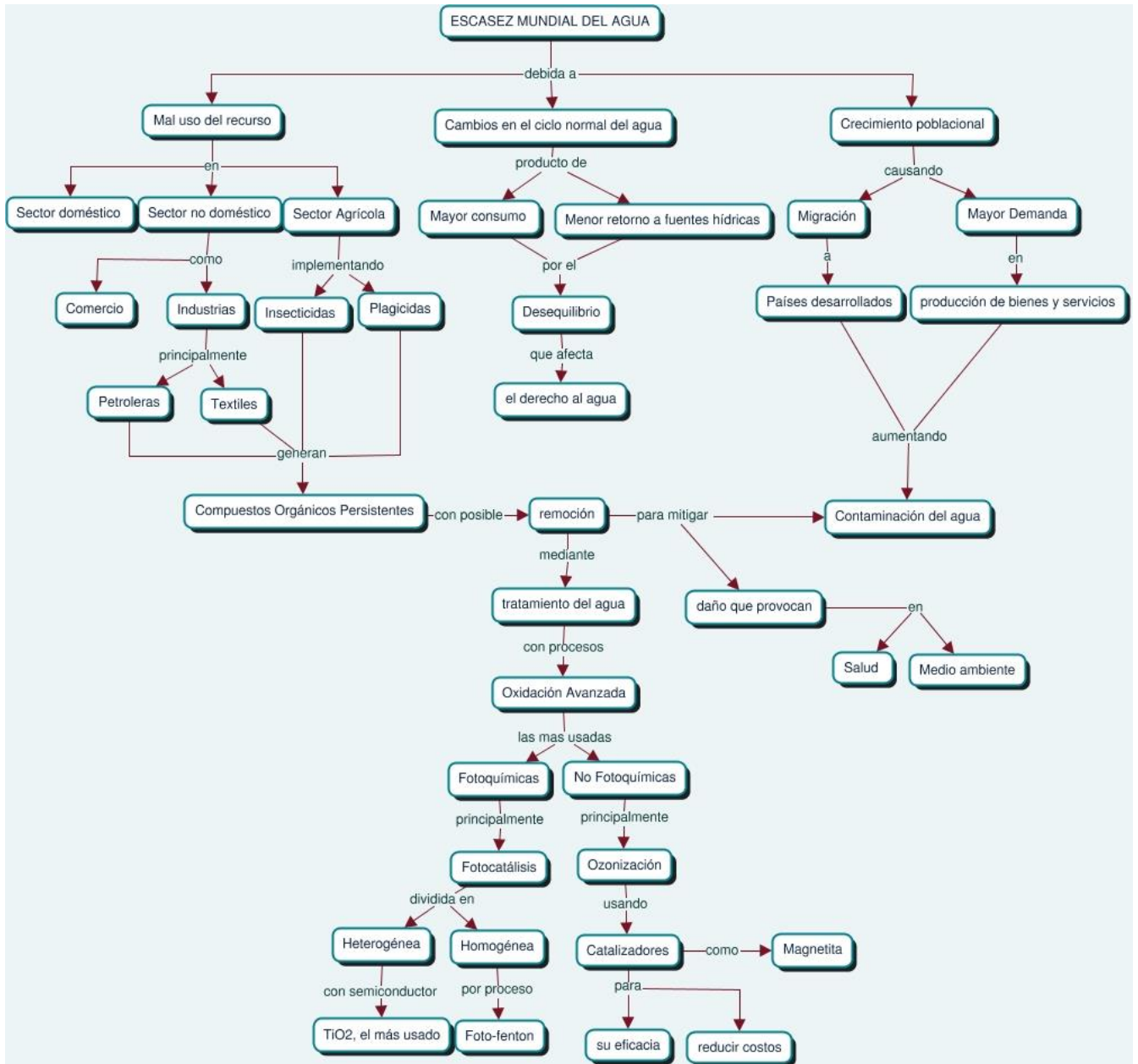
Tipo de partícula	Rango de tamaño de diámetro
Átomos y moléculas pequeñas	0,1 nm
Nanopartículas	1 a 100 nm
Partículas finas (también llamadas material particulado - PM _{2,5})	100 hasta 2500 nm
Partículas gruesas (PM ₁₀ o polvo)	2500 a 10,000 nm
Grosor del papel	100.000 nm

Fuente: TWI.2020.


Las nanopartículas de magnetita son biocompatibles, tiene una superficie que se puede modificar fácilmente para cambiar sus propiedades, se pueden sintetizar, se puede usar junto a oxidantes naturales como el ácido gálico para reducir el tamaño disolviéndolas selectivamente durante la síntesis y para mejorar sus propiedades antimicrobianas. A ellas, pueden unirse a fármacos, enzimas, anticuerpos o proteínas y pueden utilizarse en terapias dirigidas (Radon et al., 2020).

7.2. MARCO CONCEPTUAL

Imagen 14. Marco conceptual.



Fuente: autoras, 2020.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379
		DIRECTOR: Ph.D. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR, Directortrabajo de grado

9.3. MARCO LEGAL

Tabla 1. Normativa referente al reúso y vertimiento de aguas residuales.

NORMA	DESCRIPCIÓN
Constitución Política De Colombia 1991	<i>Artículos 79 y 80</i> – El Estado se ve en la obligación de fomentar la educación ambiental; prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental; imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados.
Ley 373 De 1997	Donde establecen el programa para el uso eficiente y ahorro del agua. También, la reutilización obligatoria del recurso que se utiliza en acciones que produzcan efluentes líquidos, previo a un análisis.
Resolución Número 1207 De 2014	<p><i>Artículo 5 – Del balance de materia o de masa</i> – Tanto el Usuario Generador como el Receptor deberán entregar a la Autoridad Ambiental competente los respectivos balances de masa en términos de las cantidades de agua en su sistema, en el marco del trámite de la Concesión de Aguas y/o del Permiso de Vertimientos. La Autoridad Ambiental competente deberá realizar la evaluación del balance de materia o de masa en términos de las cantidades de agua en cada sistema para efectos de otorgar la Concesión de Aguas y/o el Permiso de Vertimientos.</p> <p><i>Artículo 6 – De los usos establecidos para agua residual tratada</i> – Las aguas residuales de uso industrial tratadas se podrán usar en actividades de:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Intercambio de calor en torres de enfriamiento y en calderas. • Descarga de aparatos sanitarios. • Limpieza mecánica de vías • Riego de vías para el control de material particulado. • Sistemas de redes contra incendio.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez <u>CÓDIGO: 507899</u> Natalia Valero <u>CÓDIGO: 507379</u>
		DIRECTOR: <u>PhD. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR.</u> Directortrabajo de grado

Continuación de tabla 1. Normativa referente al reúso y vertimiento de aguas residuales.

Decreto 1076 de 2015 Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible	<i>Artículo 2.2.3.3.4.7. Fijación De La Norma De Vertimiento</i> – El MADS establece los parámetros y límites máximos permitidos en los efluentes a las aguas, al suelo y a alcantarillados. Tramitará las normas de vertimientos y establecerá las normas de vertimientos al suelo y aguas marinas.
Decreto 1541 De 1978	<i>Sección IV. Vertimiento por uso industrial. Artículo 228</i> – Los desagües y efluentes provenientes de las plantas industriales deberán evacuarse mediante redes especiales construidas para este fin, en forma que facilite el tratamiento del agua residual, de acuerdo con las características y la clasificación de la fuente receptora.
Decreto Número 3930 de 2010	Instaura los preceptos que se relacionan con el uso del recurso hídrico, su ordenamiento y los efluentes al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados.
Decreto 0631 de 2015	Por el cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones
Decreto 1594 De 1984 Usos del agua y residuos líquidos	<i>Capítulo VI – Del vertimiento de los residuos líquidos</i> <i>Artículo 60:</i> Prohíbe los vertimientos de residuos líquidos a las calles, calzadas y canales o sistemas de alcantarillado para aguas lluvias.

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL</p>		<p>ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379</p> <p>DIRECTOR: PhD. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR, Directortrabajo de grado</p>
---	--	--

Continuación de tabla 1. Normativa referente al reúso y vertimiento de aguas residuales.

<p>Ley 9 De 1979 Por la cual se dictan Medidas Sanitarias</p>	<p><i>Artículo 10</i> -Todo vertimiento de residuos líquidos deberá someterse a los requisitos y condiciones que establezca el Ministerio de salud. teniendo en cuenta las características del sistema de alcantarillado y de la fuente receptora correspondiente.</p> <p><i>Artículo 11</i> - Antes de instalar cualquier establecimiento industrial, la persona interesada deberá solicitar y obtener del Ministerio de Salud o de la entidad en quien éste delegue, autorización para verter los residuos líquidos.</p> <p><i>Artículo 14</i> - Se prohíbe la descarga de residuos líquidos en las calles, calzadas, canales o sistemas de alcantarillado de aguas lluvias.</p>
<p>Agua Limpia (CWA)</p>	<p>Usa herramientas de regulación para minimizar descargas directas de contaminantes en las fuentes hídricas. Se emplean con el objeto restaurar y el mantener la calidad de las aguas superficiales. Instaura la no realización de vertimientos contaminantes a un cuerpo de agua superficial sin permiso (Gonzalez, 2006)(Chico et al., 2014).</p>

Fuente: autoras.


 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379			
		DIRECTOR: PhD. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR Directortrabajo de grado			

Tabla 2. Criterio de calidad en uso industrial.


Variable	Unidad de medida	Valor límite máximo permisible			
		Intercambio de calor en torres de enfriamiento y en calderas	Descarga de aparatos sanitarios	Limpieza mecánica de vías y riego de vías para el control de material particulado	Sistemas de redes contra incendio
Fisicoquímicos					
pH	Unidades de pH	6,0 – 9,0	6,0 – 9,0	6,0 – 9,0	6,0 – 9,0
Microbiológicos					
Coliformes termo tolerantes	NMP/100 ml	1,0*E (+3)	1,0*E (+4)	1,0*E (+3)	1,0*E (+1)
Helminthos Parásitos Humanos	Huevos y larvas/L	0,1	1,0	1,0	0,1
Protozoos Parásitos Humanos	Quistes/L	0,0	1,0	1,0	1,0
Salmonella sp.	NMP/100 ml	1,0	1,0	1,0	1,0
Químicos					
Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno (BTEX)	mg/L	0,001		0,001	
Ésteres Ftalatos	mg/L	0,005		0,005	
Fenoles	mg/L	0,002		0,002	
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	mg/L	0,01		0,01	
Biocidas					
2,4 D ácido	mg/L	0,0001		0,0001	
Diurón	mg/L	0,0001		0,0001	
Glifosato	mg/L	0,0001		0,0001	
Mancozeb	mg/L	0,0001		0,0001	
Propineb	mg/L	0,0001		0,0001	
Iones					
Cianuro Libre	mg CN-/L	0,05			
Cloruros	mg Cl-/L	300,0		300,0	300,0
Fluoruros	mg F-/L	1,0			
Sulfatos	mg SO42-/L	500,0		500,0	500,0
Metales					
Aluminio	mg Al/L	5,0		5,0	

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL				ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379	
				DIRECTOR: PhD. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR. Directortrabajo de grado	

Continuación de tabla 2. Criterio de calidad en uso industrial.

Metales					
Aluminio	mg Al/L	5,0		5,0	
Berilio	mg Be/L	0,1		0,1	
Cadmio	mg Cd/L	0,01		0,01	
Cinc	mg Zn/L	3,0		3,0	
Cobalto	mg Co/L	0,05		0,05	
Cobre	mg Cu/L	1,0		1,0	
Cromo	mg Cr/L	0,1		0,1	
Plomo	mg Pb/L	5,0		5,0	
Hierro	mg Fe/L	5,0		5,0	
Litio	mg Li/L	2,5		2,5	
Manganeso	mg Mn/L	0,2		0,2	
Mercurio	mg Hg/L	0,001		0,001	
Molibdeno	mg Mo/L	0,07		0,07	
Níquel	mg Ni/L	0,2		0,2	
Vanadio	mg V/L	0,1		0,1	
Metaloides					
Arsénico	mg As/L	0,1		0,1	
No Metales					
Selenio	mg Se/L	0,01		0,02	
Otros					
Demanda Bioquímica de Oxígeno 5 días (DBO5)	mg O2/L			30,0	

Fuente: (RESOLUCIÓN 1207 DE 2014, 2014)

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez <u>CÓDIGO: 507899</u> Natalia Valero <u>CÓDIGO: 507379</u>
		DIRECTOR: <u>PhD. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR.</u> Directortrabajo de grado

8. ALCANCE Y LIMITACIONES

8.1. ALCANCE

Posterior a la aprobación del anteproyecto de grado, se procedió al desarrollo de las competencias necesarias para cumplir con la finalidad de esta investigación, la cual consistió en la evaluación de una muestra de agua sintética residual procedente de la industria textil para identificar los COPs presentes y, con ello, lograr su degradación parcial o total, implementando el proceso de ozonización con nanopartículas de magnetita.

8.2. LIMITACIONES

Retraso en la adquisición de un cupo para el uso del laboratorio debido a la alta demanda de estudiantes que lo requieren. O, en su defecto, imposibilidad en la síntesis de los nanomateriales.

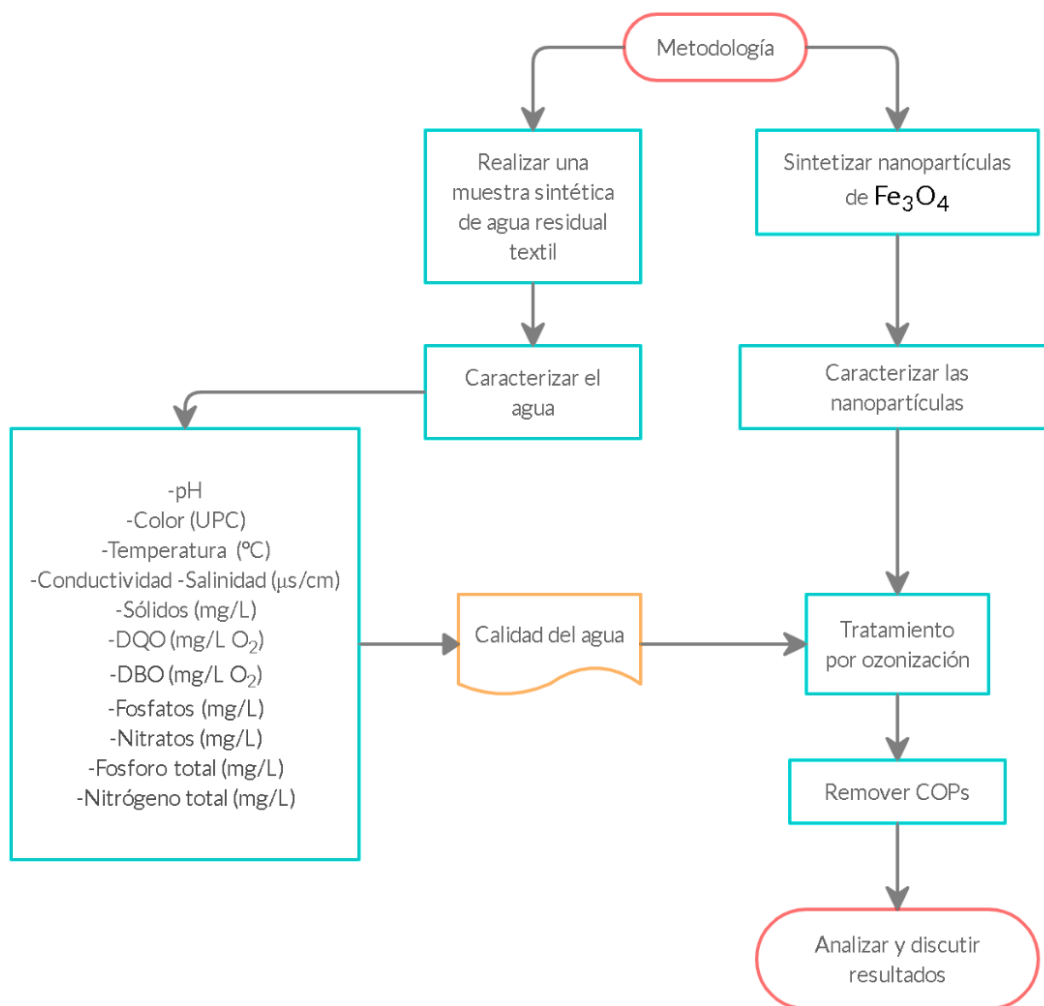
Para mitigar esta limitación se propuso llevar la muestra de agua junto con las nanopartículas sintetizadas a un laboratorio externo de la universidad. Asimismo, hacer uso de estos para la caracterización de la muestra.

Se podría trabajar con base de una modelación.

9. METODOLOGÍA

9.1. PROCEDIMIENTO

Imagen 15. Metodología.



Fuente: autoras, 2020.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379
		DIRECTOR: Ph.D. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR, Directortrabajo de grado

12.1.a. VARIABLES DEL EXPERIMENTO

Tabla 3. Variables del experimento.

Tipo de Variable	Variable	Descripción	Unidad
Independientes	Concentración de ozono	Rango de concentración: 15-25	min
	Concentración de nanopartículas	Rango de concentración: 0.1 – 0.5	g/L
	pH	Rango: 5-10	unidades de pH
	Tiempo	Rango: 1min a 2 h Toma cada 5 min	min
	Luz	Ausencia o presencia	
	Azul de metileno	Rango: 1-10	mg/L
Dependientes	Remoción de azul de metileno	Cada parámetro de la caracterización	
Intervinientes	Velocidad de agitación	120-150	RPM
	Temperatura	Toma cada 5 min	°C


Fuente: autoras,2020.

12.2. CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA Y SÍNTESIS DE LAS NANOPARTÍCULAS

Tabla 4. Parámetros para estudio de calidad de agua.

PARÁMETRO	MÉTODO ESTÁNDAR
pH (pH)	4500-H
Color (UPC)	2120
Temperatura (°C)	2550
Conductividad -Salinidad (µs/cm)	2510b-2520
Turbiedad	2130 B
Sólidos (mg/L)	2540
DQO (mg/L O ₂)	5220 D
DBO (mg/L O ₂)	5210 B
Fosfatos (mg/L)	4500-P
Nitratos (mg/L)	4500-NO ₃
Fosforo total (mg/L)	4500-P
Nitrógeno amoniacal (mg/L)	4500-NH ₃ E

Fuente: autoras

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379
		DIRECTOR: PhD. WILFREDO MARIMON BOLIVAR. Directortrabajo de grado

12.2.1. Producción de la muestra sintética: Composición de aguas residuales sintéticas (Erkan et al., 2020).

Tabla 5. Muestra sintética.

Ingrediente agregado	Cantidad g
$C_8H_4O_4^{-2}$	0.500
CH_4N_2O	0.500
$FeSO_4$	0,017
$ZnCl_2$	0.040
Azul de Metileno	0.010

Fuente: autoras

12.2.2. Síntesis de nanopartículas magnéticas verdes:

Teniendo en cuenta la síntesis verde, se usó la modificación del glutatión descrita por Marimon (Marimon, 2018). Se hicieron soluciones de 20 mL de $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ (3.6g), $FeSO_4 \cdot 4H_2O$ (1.3g), $C_3H_7NO_2S$ (1g) y una de 40 mL de NaOH (6 g), posterior a eso se pusieron en el sonicador de 3-5 min.

Se adicionó 50mL de agua destilada a en un balón aforado de 250 mL sometido a agitación mecánica (120 rpm) y en chaqueta de calentamiento, se vertió las dos soluciones de hierro al balón hasta llegar a 70°C donde se añadió 20mL de soda cáustica hasta llegar a un color negro en la solución, pasados 5, 10, 15, 20 y 25 min se añadió 3mL de NaOH.

Pasados 30 minutos de agitación y teniendo una temperatura de 85°C, se añadió la cisteína y un minuto después se agregó 3 mL de soda para mantener el pH alcalino. Al completar 1 hora de agitación se retiró el balón de la chaqueta y se separaron las partículas usando un campo magnético y retirando agua sobrenadante para llevarlas al horno durante 12 horas a temperatura 40°-45°C.

12.2.3. Caracterización de nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4):

Las propiedades magnéticas de las nanopartículas se estudiaron mediante medidas de magnetómetro de muestra vibratoria (VSM Lakeshore, Modelo 665) a una temperatura de 300K y con mediciones de magnetización en función del campo aplicado en un rango entre -30 kOe a 30 kOe. El recubrimiento orgánico adherido a la superficie de la partícula se determinó mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier en un equipo SHIMADZU IR Prestige21 FTIR Spectrometer, donde la muestra se diluyó en KBr y se realizaron 150 barridos leídos por un detector de nitrógeno líquido en el método de transmitancia. El tamaño físico de las partículas se midió a través de microscopia electrónica de barrido SEM en un CARL ZEISS MODELO EVO HD MA 15 donde fue necesario un recubrimiento de oro para la conductividad de la muestra. La caracterización cristalográfica se realizó a través de un análisis de difracción de rayos x en un PROYECTO X'PERT

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379
		DIRECTOR: Ph.D. WILFREDO MARIMON BOLIVAR. Directortrabajo de grado

PRO MPD PANalytical, donde las MNPs secas se sometieron a bombardeo con rayos x emitidos de un ánodo de Cu con longitud de onda 1.54 Å en un rango de 10° - 90° con tamaño de paso de 0.026 y un tiempo de paso de 20 s. El análisis termogravimétrico se llevó a cabo en (TGA, DMSE SDTQ600). Las mediciones de pérdida de masa se tomaron en un rango de temperatura de 25°-600°C, donde unos pocos miligramos de la muestra fueron puestos en un soporte de aluminio y sometidos a la velocidad de calentamiento de 10°C/min. El potencial electro cinético superficial de las partículas y el tamaño hidrodinámico se determinaron por mediciones de potencial Zeta en un Nano Zvernizador Malvern (ZS90), los valores reportados fueron el promedio de 5 mediciones las cuales cada se realizó en medio acuoso celdas de plástico y bajo un potencial a diferentes valores de pH. El radio hidrodinámico se determinó por la técnica de Dynamic Light Scattering (DLS) que arrojó el índice de polidispersidad (PDI) en cada una de las mediciones (Marimon, 2018).

12.2.4. Ozonizador con fuente de aire:

Hoy por hoy, existen varios métodos para generar ozono, ya sea usando equipos o descargas, el más usado es la descarga de corona. Para este experimento se utilizó un ozonizador con una fuente de aire.


12.3. TRATAMIENTO DE OZONIZACIÓN

12.3.1. Oxidación con ozono

El ozono se produjo a partir del oxígeno y se suministró a un reactor de 1 L bien agitado a través de un difusor de vidrio sinterizado a un caudal constante de 400 mL min⁻¹ y una concentración de ozono de entrada (~15 mg/L a temperatura y presión normales (NTP) de 0 ° C y 1 atm). Se recolectaron muestras de 1 mL y se apagaron inmediatamente agregando 100 µL de una solución de tiosulfato de sodio Na₂S₂O₃(0,1 M) para eliminar el ozono residual. Las muestras se filtraron a través de filtros de jeringa de teflón de 0,45 µm antes de almacenarlas a 4 ° C para su posterior análisis por HPLC / UV. Las muestras analizadas por espectrofotometría UV. La concentración de ozono en la fase líquida se determinó mediante el método colorimétrico índigo (Lobna et al., 2019).

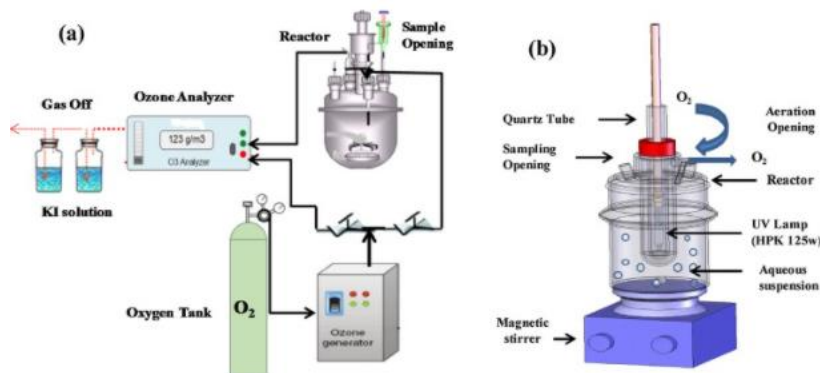
12.3.2. Ozonización catalítica:

Los experimentos de degradación por lotes de azul de metileno se llevaron a cabo en un vaso de precipitados de fondo plano de 500 ml. El ozono se produjo por un generador de ozono a partir de aire. En cada experimento semidiscontinuo, la dosis de catalizador deseada se mezcló con 400 mL de solución acuosa de azul de metileno en un vaso de precipitado de fondo plano de 500 ml con agitación mecánica. Luego, se burbujeó continuamente ozono con un caudal deseado en la

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379
		DIRECTOR: Ph.D. WILFREDO MARIMON BOLIVAR. Directortrabajo de grado

solución de reacción a través de un difusor de gas. Durante el proceso de reacción, se sacaron del reactor 1.5 mL de solución de azul de metileno e inmediatamente se mezclaron con 20 μ L de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 200 mM para apagar la reacción. Luego, las muestras se filtraron con un filtro de jeringa de una sola vez de 0,45 μ m para su análisis en cada intervalo de 5 minutos. Todo el proceso del experimento se realizó a una temperatura de funcionamiento de 25 ± 1 °C mediante calentamiento en baño de agua. Para probar la reciclabilidad y estabilidad del Fe_3O_4 , las partículas se recolectaron por separación magnética después de la reacción, se lavaron varias veces con agua pura y etanol después de cada ciclo y se secaron a 70 °C durante 8 h antes de su reutilización. Todos los experimentos se realizaron por triplicado y la barra de error representó la desviación estándar de los datos experimentales replicados (Heng et al., 2020).

Imagen 16. (a) sistema de ozonización catalítica; (b) Reactor fotocatalítico con lámpara UV de mercurio (HPK 125 W).



Fuente: (Lobna et al., 2019)

12.4. CINÉTICA DE ADSORCIÓN

La cinética de adsorción está en función de la variación de la concentración de azul de metileno y el tiempo; lo que permite predecir la velocidad que toma el material para remover el contaminante del agua residual. Para su descripción es necesario conocer algunas leyes de velocidad que describen el sistema de adsorción.

Imagen 17. Modelos cinéticos

Kinetics models and their linear forms.

Kinetic model	Non-Linear form	Linear form	Plot
Pseudo-First order	$q_t = q_e [1 - e^{-k_1 t}]$	$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \left(\frac{k_1}{2.303}\right)t$	$\log (q_e - q_t)$ vs. t
Pseudo-Second order	$q_t = \frac{k_2 t}{1 + k_2 q_e t}$	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \left(\frac{1}{q_e}\right)t$	(t/q_t) vs. t
Intraparticle diffusion	—	$q_t = K_f t^{0.5} + X$	q_t vs. $t^{0.5}$
Elovich equation	$\frac{dq_t}{dt} = \alpha e^{-\beta q}$	$q_t = \frac{1}{\beta} \ln \alpha \beta + \frac{1}{\beta} \ln t$	q_t vs. $\ln t$

Fuente: (Elwakeel & Guibal, 2015).

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379
		DIRECTOR: Ph.D. WILFREDO MARIMON BOLIVAR, Directortrabajo de grado

Mediante las ecuaciones presentadas en la imagen 17 se determinó la adsorción hallando las constantes k_1 , k_2 , α , β y k , correspondientes al Pseudo Primer Orden (min^{-1}), Pseudo segundo orden ($\text{g mmol}^{-1} \text{min}^{-1}$), constante de la ecuación de Elovich ($\text{mmol.g}^{-1}.\text{min}^{-1}$), exponente en la ecuación de Elovich (g/mmol) y constante de difusión, respectivamente (Marimon, 2018).

Para el cálculo de la capacidad de absorción se usó:

$$q = \frac{(C_o - C_f)V}{m}$$

12.5. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

Su función es describir la adsorción indicando la distribución de las moléculas del componente adsorbido en una interfase con su concentración cuando se alcanza el estado de equilibrio que se describe mediante los siguientes modelos matemáticos.


Imagen 18. Ecuaciones de isotermas

Sorption isotherms: equation in their linear and non-linear forms.

Isotherm	Non-Linear form	Linear form	Plot
Langmuir	$q_{eq} = \frac{q_{mL} K_L C_{eq}}{1 + K_L C_{eq}}$	$\frac{C_{eq}}{q_{eq}} = \frac{C_{eq}}{q_{mL}} + \frac{1}{K_L q_{mL}}$	$\frac{C_{eq}}{q_{eq}}$ vs. C_{eq}
Freundlich	$q_{eq} = K_F C_{eq}^{1/n}$	$\ln q_{eq} = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_{eq}$	$\ln q_{eq}$ vs. $\ln C_{eq}$
Dubinin-Radushkevich	$q_{eq} = Q_{DR} \exp^{-K_{DR} \epsilon^2}$	$\ln q_e = \ln Q_{DR} - K_{DR} \epsilon^2$	$\ln q_{eq}$ vs. ϵ^2

Fuente: (Elwakeel & Guibal, 2015)

En la imagen 18 se observa las ecuaciones usadas para comparar la cantidad de azul de metileno removido y la cantidad en solución al alcanzar equilibrio, donde q_e capacidad de adsorción en equilibrio (mmol/g), q_t capacidad de adsorción en el tiempo medido (mmol/g), q_e cantidad de material absorbido en el equilibrio (mmol/g), C la concentración de equilibrio (mmol l^{-1}), q_m la cantidad de metal o contaminante necesario para formar un monocapa en la superficie (mmol g^{-1}), K_L la constante de equilibrio de Langmuir, y K_F la constante de equilibrio de Freundlich. n es el exponente de cada ecuación característica (Marimon, 2018).

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez <u>CÓDIGO: 507899</u> Natalia Valero <u>CÓDIGO: 507379</u>
		DIRECTOR: <u>Ph.D. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR,</u> Directortrabajo de grado

10.RESULTADOS

10.1. Síntesis y caracterización de la magnetita

Para la síntesis se realizó el proceso descrito en el ítem 12.2, en la ilustración 1 se evidencia de izquierda a derecha la elaboración que incluye las soluciones, la chaqueta de calentamiento en constante agitación, la separación de las nanopartículas para llevarlas al horno y finalmente el recipiente para su conservación en un refrigerador. Cada vez que se necesitaban las Cys@MNPs se dejaban un tiempo suficiente en el sonicador para su uso posterior.

Ilustración 1. Síntesis de nanopartículas.




Fuente: autoras

13.1.a. XRD Análisis

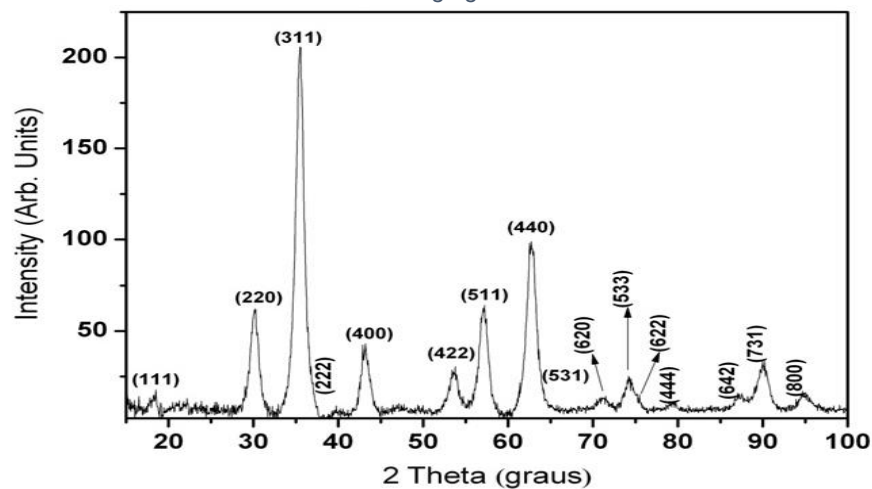
El XRD es el medio utilizado para la caracterización cristalográfica, este se basa en la difracción de rayos X para identificar los planos cristalinos del material, es una técnica fundamentada en la ley de Bragg (Almazan, 2016).

Se usó radiación por $\text{CrK}\alpha$ y Cu , con un rango angular entre 20 y 90 grados. En las ilustraciones 2 y 3 se puede observar los difragnetogramas de MNPs por el método convencional Fuente: (Mamani et al., 2013), y el que se obtuvo para la Cys con MNPs, respectivamente. Al compararlos se puede evidenciar una estructura

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379
		DIRECTOR: PhD. WILFREDO MARIMON BOLIVAR. Directortrabajo de grado

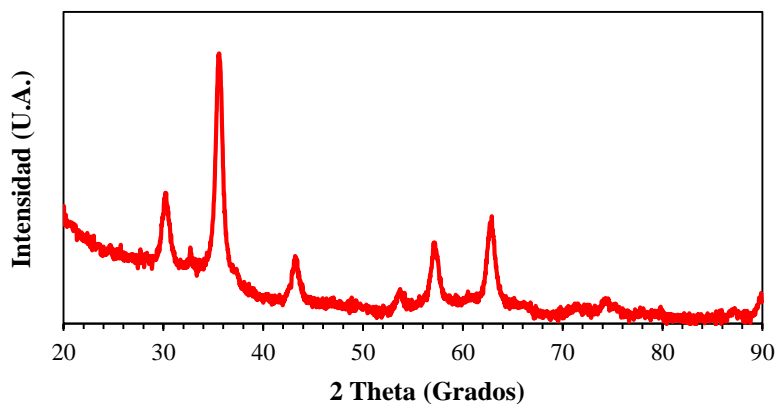
atómica de espinela inversa (Almazan, 2016) y picos con intensidad que demuestran un comportamiento de la presencia de policristales de la magnetita en los siguientes índices de Miller : 220, 311, 400, 422, 511, 440, 533, 73.

Ilustración 2. Difractograma de MNPs.



Fuente: (Almazan, 2016)

Ilustración 3. Difractograma Gisteína@MNPs



Fuente: autoras

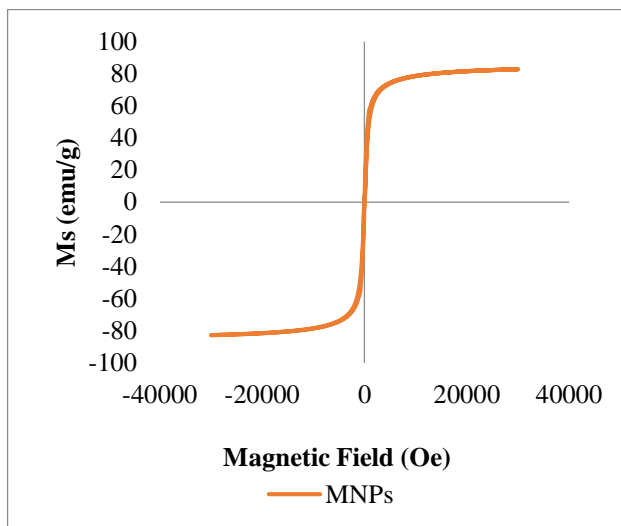
13.1.b. Propiedades Magnéticas

Este parámetro se obtiene a través de una curva de saturación magnética de las nanopartículas sintetizadas a temperatura ambiente. La curva de la ilustración 4 alcanzó un valor de 82.67 emu/g, cercano al teórico para la magnetita que es de 90 emu/g, según los estudios previos de (Marimon, 2018). Se evidencia una acertada disminución de los átomos de hierro (III) a hierro (II) con la relación molar adecuada

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379
		DIRECTOR: Ph.D. WILFREDO MARIMON BOLIVAR. Directortrabajo de grado

para una reacción de precipitación y por ende un ordenamiento adecuado de los momentos magnéticos (Marimon, 2018).

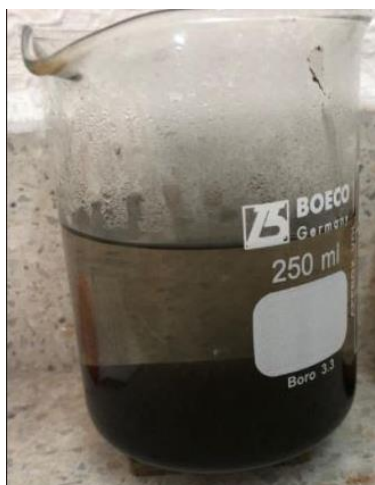
Ilustración 4. Curva de saturación magnética de MNPs.



Fuente: autoras

Asimismo, la ausencia de un bucle de histéresis magnética indica que la remanencia y coercitividad son cero (0) (Heng et al., 2020) lo cual define al material como superparamagnético y con una alta separabilidad; características que se comprobaron al acercar un campo magnético externo (imán) al recipiente que contenía la solución donde se atrajeron las MNPs (Ilustración 5) y que al retirarse produjo una disociación uniforme de color café oscuro. Lo anterior, conviene para el reúso de las nanopartículas.

Ilustración 5. Cys@MNPs bajo efecto de imán

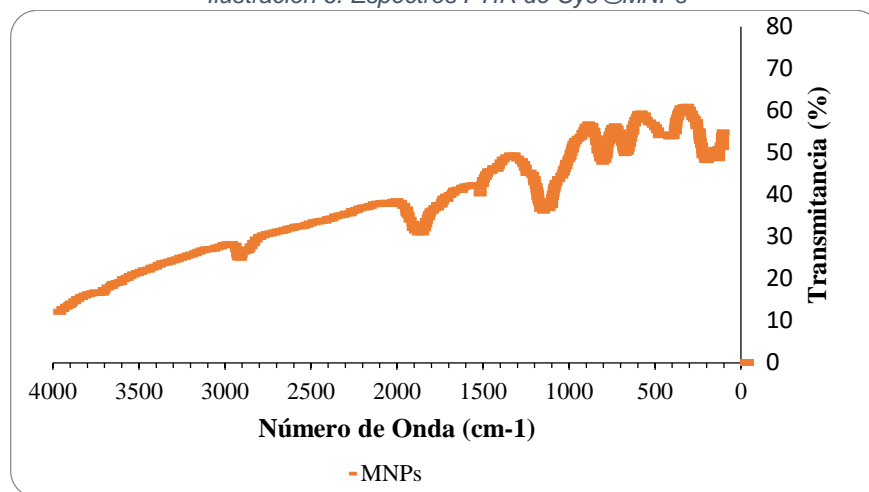


Fuente: autoras

13.1.c. FTIR

La espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) es el método que se usó para identificar en la huella digital del material magnetita los grupos funcionales presentes en ella, así como los estiramientos de sus enlaces. Se usaron tablas de longitud de adsorción de infrarrojo (que se representan en las bandas) como guía en la curva que se realiza en cm^{-1} para su reconocimiento (Mata-Miranda et al., 2017).

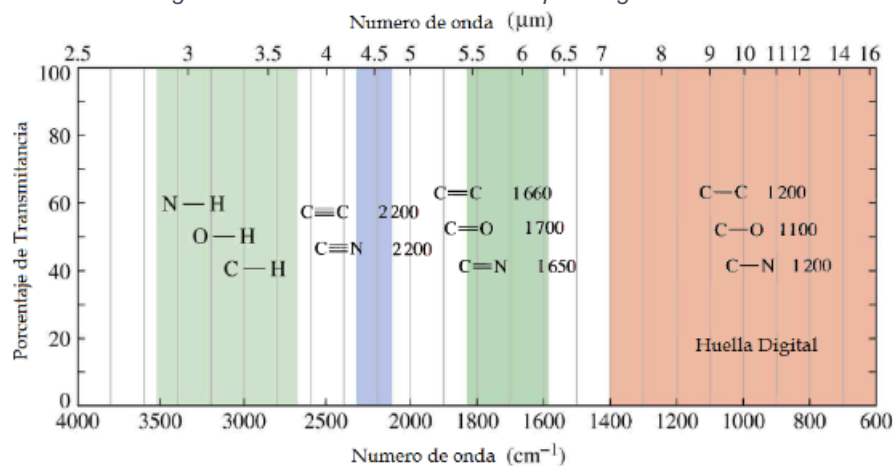
Ilustración 6. Espectros FTIR de Cys@MNPs



Fuente: autoras

En la ilustración 6 se puede ver las bandas correspondientes al enlace de estiramiento N-H del grupo amina ($\sim 2994 \text{ cm}^{-1}$) el enlace de vibración de C=O ($\sim 1151 \text{ cm}^{-1}$) el enlace de estiramiento del Fe y O correspondientes a la presencia de magnética ($\sim 229 \text{ cm}^{-1}$) finalmente la usencia del enlace libre del Tiol ($\sim 2500 \text{ cm}^{-1}$) indica que el SH en la cisteína es el responsable de crear el enlace con la partícula (Coates, 2006).

Imagen 19. Frecuencias vibracionales para algunos enlaces



Fuente: Maidana, F. 2017

10.2. Preparación de agua residual sintética

En las tablas 6-7 y las gráficas de las ilustraciones 8-9, se puede ver las concentraciones de soluciones conocidas que se obtuvieron a partir de una solución madre obtenida en el primer caso con 0.05 gramos de azul de metileno en 500mL para una concentración de 100mg/L. Y, en la segunda con la síntesis de agua residual donde se usó la cantidad de sustancia que se describe en la tabla 6 del presente, la cual también se llevó a un balón de 500mL.

Ilustración 7. Diferentes concentraciones de agua sintética residual y azul de metilo.



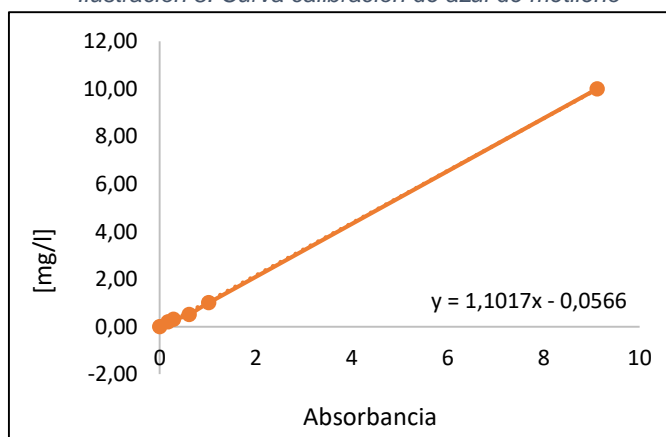
Fuente: autoras

Tabla 6. Datos curva de ilustración 1

DATOS DILUCIÓN AZUL DE METILENO	
[mg/l]	Absorbancia 600-663
0.00	0
0.20	0.168
0.30	0.283
0.50	0.613
1.00	1.02
10.00	9.117

Fuente: autoras

Ilustración 8. Curva calibración de azul de metileno



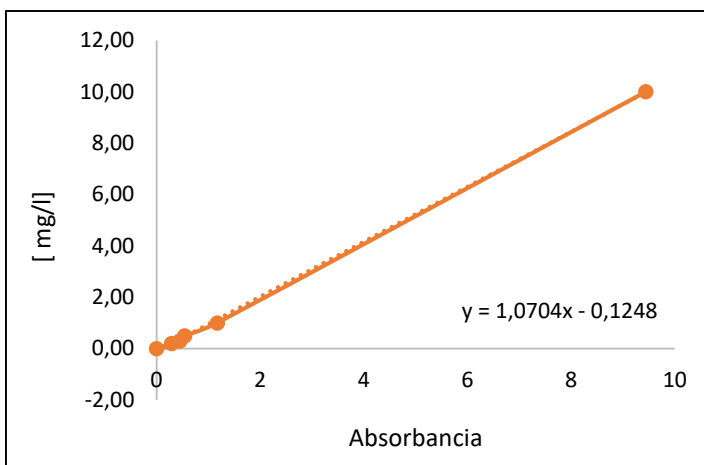
Fuente: autoras

Tabla 7. Datos curva de ilustración 2

DILUCIÓN AZUL DE METILENO CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA	
[mg/l]	Absorbancia 600-663
0.00	0
0.20	0.292
0.30	0.455
0.50	0.545
1.00	1.175
10.00	9.443

Fuente: autoras

Ilustración 9. Curva calibración azul de metileno y agua residual



Fuente: autoras

10.3. Ensayos de adsorción

13.3.a. Efecto del pH

El pH fue un parámetro importante durante todos los ensayos debido a que este ayuda a que los procesos de ionización que se lleven a cabo. En este caso, el que más favorece a la adsorción es el pH de 9.5.

El pH en el punto de carga cero (pHPCC) para la magnetita sintética es de 7.9 (Kosmulski, 2004) y el pH de la solución con azul de metileno se mantuvo en un rango de 5.0- 10.

Para llevar a cabo el proceso se usó cisteína (Cys) $\text{CH}_2\text{-CHNH}_2\text{-COOH}$; un aminoácido azufrado anfótero donde el pH ácido causa una protonación en el grupo amino y, un pH básico genera una pérdida de protones en el grupo carboxilo; por lo anterior, la Cys tuvo una carga superficial positiva favoreciendo la adsorción de cationes y una carga superficial negativa que favoreció la adsorción de aniones. En la ilustración 11, se puede ver que el grado de adsorción es mayor a medida que aumenta el pH, donde se comprueba así lo anteriormente expuesto y se ratifica que los resultados obtenidos concuerdan con trabajos previos como en (Doğan et al., 2009) (Doğan et al., 2004) debido a que el AM es un colorante catiónico.

En la ilustración 11 se observa que la capacidad de adsorción máxima se alcanza en un pH alcalino de 9.5, y una tendencia de relación donde a mayor pH, mejor será la capacidad de adsorción, ya que las variaciones entre 7.0-9.0 no son significativas.

Como se evidencia en estudios de adsorción de azul de metileno sobre oxido de grafeno y carbón activado (Castellar et al., 2013)(Chaparro et al., 2014).

Para regular el pH se usó NaOH y HCl.

Ilustración 10. Diferente pH en agua residual sintética



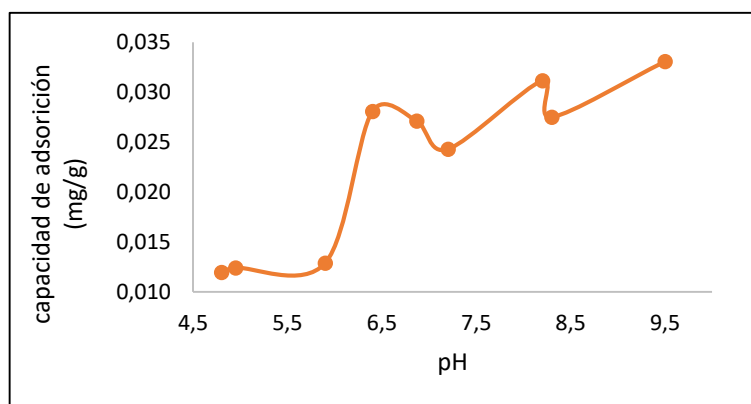
Fuente: autoras

Tabla 8. Datos variación pH

q (mg/g)	pH
0.012	4.8
0.012	5.0
0.013	5.9
0.028	6.4
0.027	6.9
0.024	7.2
0.031	8.2
0.028	8.3
0.033	9.5

Fuente: autoras

Ilustración 11. Efecto del pH



Fuente: autoras

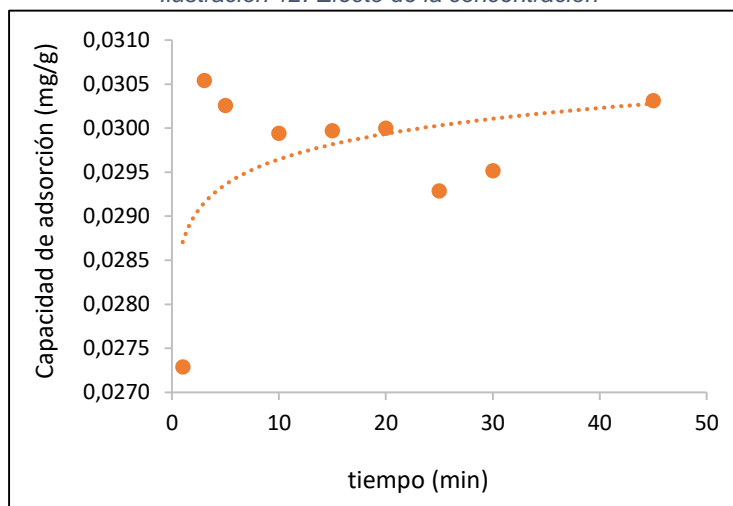
13.3.b. Cinética de adsorción

Tabla 9. Concentración final

tiempo	Cf	qt
0	-0.125	0.0567
1	0.977	0.0273
3	0.855	0.0305
5	0.865	0.0303
10	0.877	0.0299
15	0.876	0.0300
20	0.875	0.0300
25	0.902	0.0293
30	0.893	0.0295
45	0.863	0.0303
120	0.786	0.0324

Fuente: autoras

Ilustración 12. Efecto de la concentración

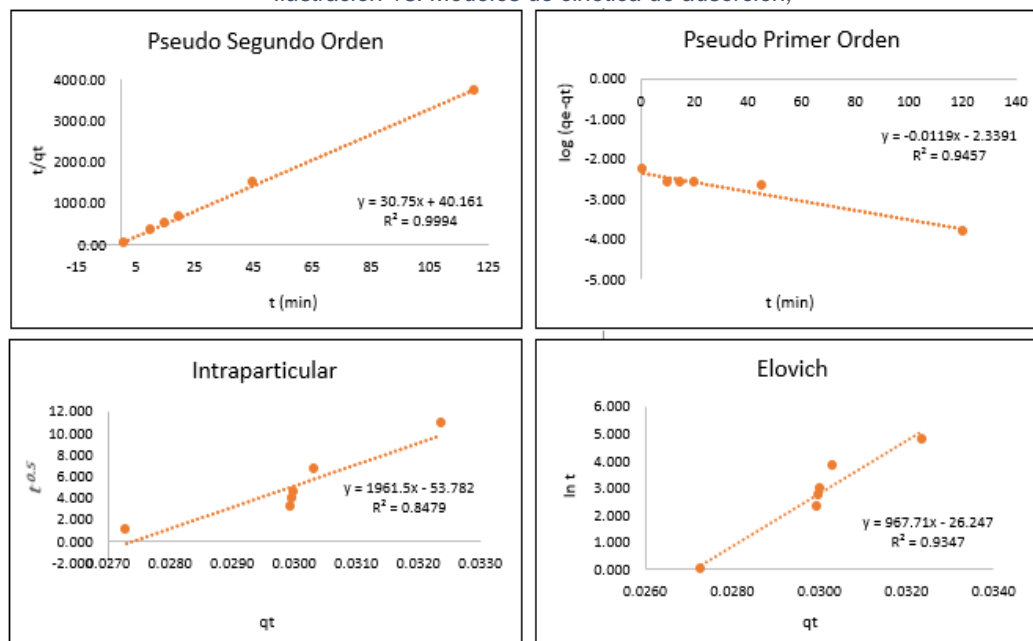


Fuente: autoras

La ilustración 12 es el comportamiento de la concentración donde se ve el comportamiento cinético de la adsorción de azul de metileno sobre Cys@MNPs. A fin de ampliar el conocimiento del fenómeno cinético se realizó el modelamiento con datos experimentales como sigue.

La siguiente ilustración muestra el modelamiento cinético en forma lineal de los datos experimentales, donde el mejor ajuste se presenta en el pseudo segundo orden (debido a que presenta mayor R^2), lo cual indica que la cinética de adsorción del azul de metileno sobre la Cys@MNPs con una velocidad de adsorción (entre adsorbato y superficie) es dominada por quimisorción (Chen et al., 2019), es decir, sus interacciones se localizan en los llamados sitios activos (Bae et al., 2021) y es favorable hacia los grupos funcionales que expone el material Cys@MNPs. Confirmando la teoría estudiada por muchos autores como se corrobora en (Plazinski et al., 2013).

Ilustración 13. Modelos de cinética de adsorción,



Fuente: autoras

En la tabla 10 se resumen los parámetros de la modelación, siendo el pseudo segundo orden el más favorable. Su pendiente e intersección se utilizaron para el cálculo tanto de la constante de velocidad K_2 como la capacidad de adsorción q_e , gracias a la forma lineal de la imagen 17. El modelo intraparticular ayuda a identificar el mecanismo de difusión del azul de metileno en los poros (sitios activos) de la Cys@MNPs. El modelo pseudo primer orden presenta linealidad en los primeros 20 minutos donde se da una adsorción rápida que luego se desvía y en el modelo de Elovich no presenta algún momento de linealidad (Wu et al., 2021).

Tabla 10. Parámetros de la cinética de adsorción de azul de metileno.

Modelo cinético	Parámetro	Valor	Unidad
Pseudo Segundo Orden	q_e	0.033	mg/g
	K	23.544	min^{-1}
	R^2	0.999	adimensional
Pseudo Primer Orden	q_e	0.005	(mg/g)
	K_1	0.027	$\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$
	R^2	0.946	adimensional
Intraparticular	K_2	1961.500	$\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$
	X	-53.782	mg/g
	R^2	0.848	adimensional
Elovich	β	0.001	g/mg
	α	941.816	$\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$
	R^2	0.935	adimensional

Fuente: autoras

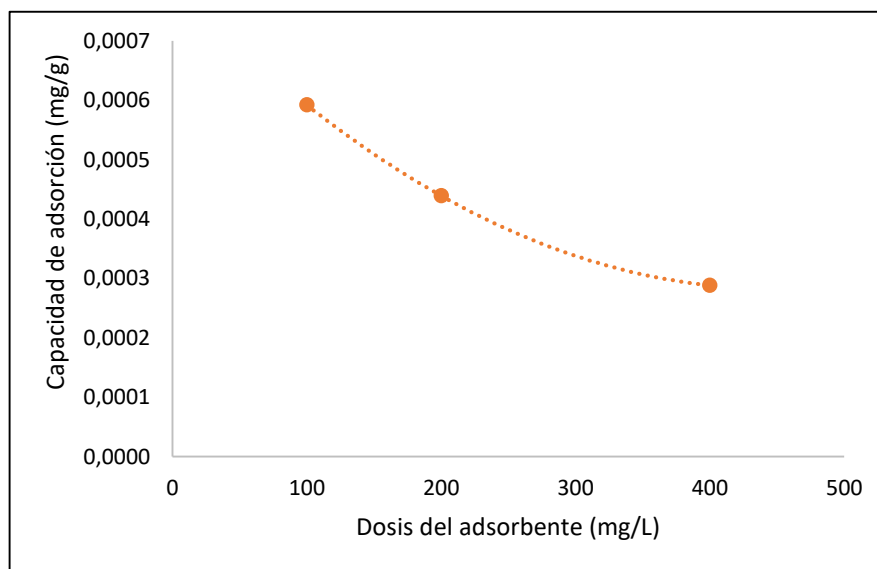
13.3.c. Isotermas de adsorción

Tabla 11. Dosis de adsorbente, de autoras

Datos iniciales	
Peso de NP (g)	5.051
Peso NP para muestra (g)	2.5
Volumen para 10000 mg/L	250

NP Fe ₃ O ₄ [mg/l]	qe (mg/g)
100	0.0006
200	0.0004
400	0.0003

Ilustración 14. Dosis de adsorbente.

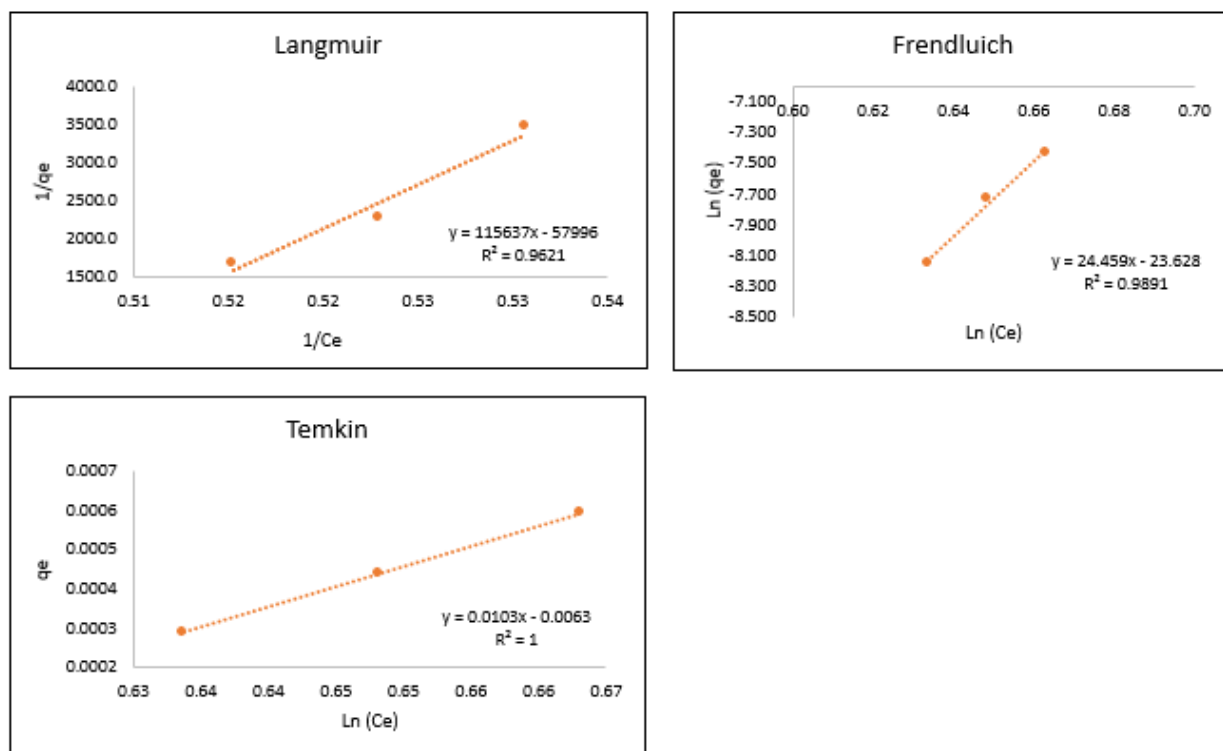


Fuente: autoras

En la ilustración 14 se observa la capacidad de adsorción en función de la concentración del adsorbente con una relación inversa debido a que la capacidad disminuye cuando aumenta la dosis del material sintético que contiene una alta concentración inicial de AM con menores cantidades de MNPs, es decir, a mayor número de moléculas adsorbentes se aumenta la superficie y disminuye la capacidad de adsorción, pero aumenta el porcentaje de remoción (Guaypatin, 2020). Para identificar cuál fue el mecanismo de adsorción más adecuado se realizan los ajustes lineales de los modelos isotérmicos y se halla la capacidad máxima de adsorción que se muestra a continuación.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379
		DIRECTOR: PhD. WILFREDO MARIMÓN BOLIVAR, Directortrabajo de grado

Ilustración 15. Modelos de isotermas.



Fuente: autoras

Los valores de R^2 mayores a 0.95 indican que todos los modelos son adecuados para el ajuste de adsorción del azul de metileno, pero el que más favorece corresponde a Temkin (ecuación derivada de Langmuir), el cual describe que la energía de unión está relacionada al calor de adsorción (Guaypatin, 2020).

El calor de adsorción está comprendido por todas las moléculas existentes en una capa y disminuye de forma lineal debido a la interacción entre sorbato y el sorbente (Basu et al., 2017).

La variación de la energía de adsorción, ΔQ , y la constante de equilibrio de Temkin, K_0 , se calcularon a partir de la pendiente y la intersección de la gráfica, usando un valor de 8.314 J/mol como constante de gas (Hamdaoui & Naffrechoux, 2007).


 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379
		DIRECTOR: PhD. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR, Directortrabajo de grado

Tabla 12. Parámetros de la cinética de adsorción de azul de metileno.

ISOTERMA	Parámetro	Valor
Langmuir	q_m (mg/g)	0.008647751
	KI	1.9939
	R2	0.9621
Freundlich	N	0.0409
	Kf	1.83E+10
	R2	0.9891
Temkin	RT/ ΔQ	0.0103
	K0	0.5425
	R2	1.0000

Fuente: autoras

En la tabla 12 se resumen los parámetros de la modelación, para el cálculo de q_m se utiliza la ecuación de Langmuir, este parámetro indica la capacidad máxima de adsorción. Es un modelo centrado en la adsorción de una monocapa y la homogeneidad de los sitios de adsorción (Basu et al., 2017).

Tabla 13. Máxima capacidad de adsorción de alguno adsorbentes de estudios previos sobre azul de metileno

MATERIAL	q_m (mg/g)	Co (mg/L)	q_m/Co (L/g)	Ref
Cáscara de yuca (Manihot esculenta) modificada con ácido fosfórico	79.98	400	0.1999	(Albis et al., 2017)
Nanopartículas magnéticas Fe ₃ O ₄ y carbon activado	57.47	100	0.5747	(Carrillo & Herrera, 2019)
Óxido de grafeno	714.00	312	2.2885	(Yang et al., 2011)
Carbón activado a base de bambú	454.20	500	0.9084	(Hameed et al., 2007)
Compuesto de grafito expandido modificado/Fe ₃ O ₄	79.05	100	0.7905	(Wu et al., 2021)
Este estudio	0.008647751	2	0.0043	

Fuente: autoras

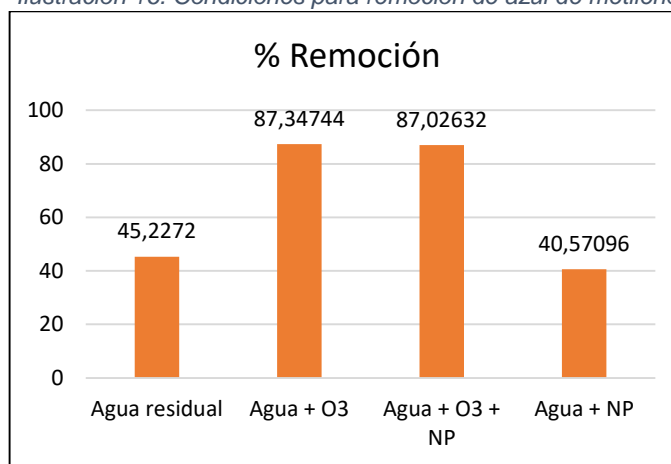
Comparando los resultados de la tabla 13 y teniendo en cuenta que la concentración inicial usada en este estudio fue muy baja se deduce que la capacidad de adsorción máxima sobre el azul de metileno del material Cys@MNPs es aceptable.

10.4. Porcentaje de remoción

$$E = \frac{Ci - Cf}{Ci} * 100$$

El porcentaje de remoción de azul de metileno de agua sintética para este proyecto fue de 60.7%, usando una concentración inicial de 2 mg/L y una concentración final de 0.786 mg/L proveniente del ensayo de cinética de adsorción en el que se varió el tiempo y se usaron muestra de 40 mL de agua con 1.5mL de Cys@MNPs.

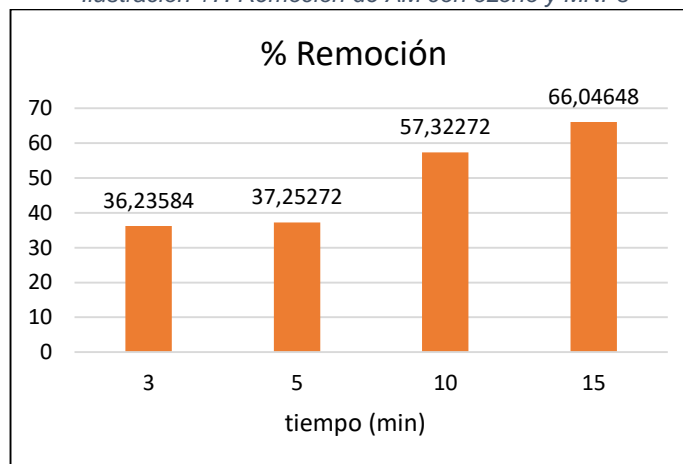
Ilustración 16. Condiciones para remoción de azul de metileno



Fuente: autoras

La ilustración 16 muestra el porcentaje de remoción de azul de metileno con el método del test de jarras (en 60 minutos con 20 RPM) a diferentes condiciones, usando 10 mL de nanopartículas, 250 mL de agua residual sintética y 15 minutos de aplicación de ozono en las condiciones 2 y 3 (a través de las mangueras del ozonizador).

Ilustración 17. Remoción de AM con ozono y MNPs



Fuente: autoras

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379
		DIRECTOR: PhD. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR, Directortrabajo de grado

Con la ilustración 17 se corrobora que, a mayor concentración de ozono, mayor será el porcentaje de remoción. Debido a que la concentración de ozono no se puede controlar, se ajusta respecto a la cantidad de ozono suministrada en un tiempo determinado. La condición para este caso fue de 250 mL de agua residual con 10 mL de nanopartículas y 60 minutos del test de jarras a 20 RPM.

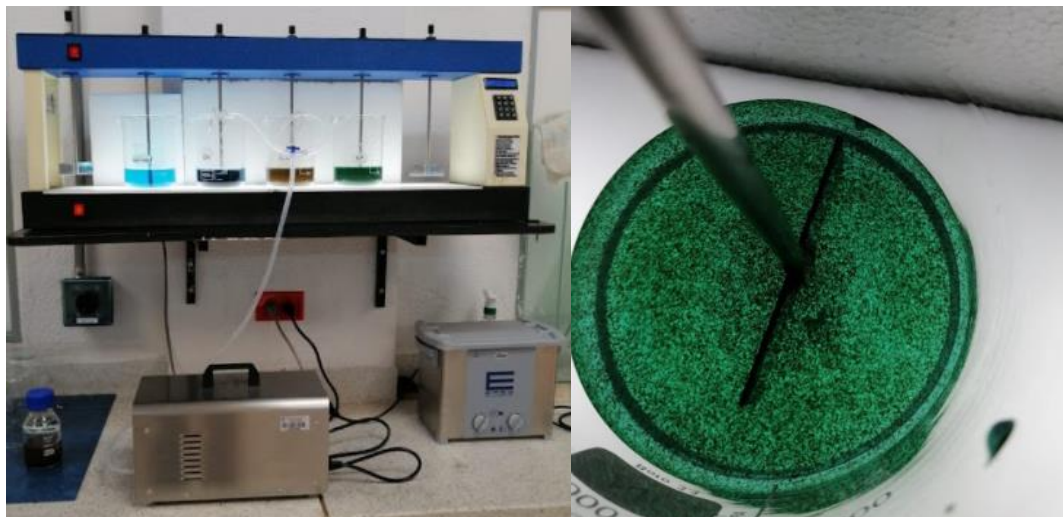
Tabla 14. Porcentaje de remoción diferentes condiciones.

Porcentaje de remoción	Condición
60.70%	Estudio cinético en función del tiempo
66.05%	Agua residual con ozono
87.02%	Agua residual con ozono y nanopartículas

Fuente: autoras

En la tabla 14 se puede identificar que el método más efectivo para la remoción de azul de metileno en este estudio es el de agua residual con ozono y nanopartículas, ya que presenta un mayor porcentaje de remoción.

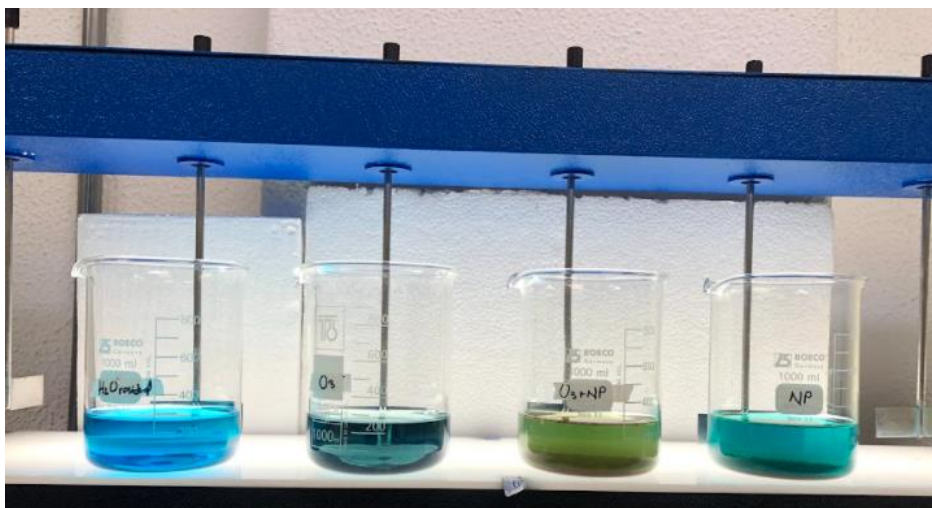
Figura 5. Foto del montaje para test de jarras



Fuente: autoras

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379
		DIRECTOR: PhD. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR, Directortrabajo de grado

Figura 6. Test de Jarras con ozono, de



Fuente: autoras

10.5. Cálculos de aplicación a escala en aguas residuales para adsorber azul de metileno

Se propone el cálculo para tratar un efluente contaminado con el colorante azul de metileno de flujo promedio 1000 m³/día y concentración inicial del tinte de 1000 ppb para lograr una concentración aceptada según la regulación colombiana (Decreto 1594 de 1984) de 500 ppb (0.5 mg/L)

Donde la cantidad de nanomaterial está dado por:

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

Con \dot{m} = cantidad de nanomaterial necesario para el tratamiento (g/día), Q = caudal a tratar (m³/día) C_i = concentración inicial de AM (ppb) C_f = concentración a la que se quiere llevar el contaminante en el efluente de salida (ppb) F = factor de seguridad de tratamiento con valores entre 1.3 y 1.7 (Marimon, 2018).

Teniendo en cuenta lo anterior se usó un parámetro F de 1.5 y capacidad máxima de adsorción de 0.008647751 mg/g para obtener la cantidad de 1.82E+07 g/día.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379
		DIRECTOR: Ph.D. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR, Directortrabajo de grado


10.6. Costo a gran escala de 1 gramo de adsorbentes para la remoción de azul de metileno

Tabla 15. Costo a escala de un gramo de adsorbente.

Tecnología	Ítem	Cantidad necesaria	Valor unitario	Valor total
Cys@MNPs Fe3O4	FeCl3	3,6 g	\$0.8/kg	\$ 0.0288
	FeSO4	1,3 g	\$0.06/kg	\$ 0.0001
	NaOH (50%)	6 g	\$0.3/kg	\$ 0.0018
	Cisteína	1 g	\$0.876/g	\$ 0.8760
	Agua	250 g	0.0012\$/kg	\$ 0.0003
	Gastos de operación			\$ 0.8000
	TOTAL			\$ 1.7070


Fuente: autoras

Para realizar la tabla 15 se tuvo en cuenta un factor de 1.5, así como gastos de operación con dos operarios para un tiempo de trabajo de 4 horas con dos salarios mínimos (SMMV en 2021) y precios a gran escala tomados de compras online para precios industriales.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez <u>CÓDIGO: 507899</u> Natalia Valero <u>CÓDIGO: 507379</u> DIRECTOR: <u>PhD. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR,</u> Directortrabajo de grado
--	--	---


CONCLUSIONES

- Se estableció la eficiencia de la combinación de nanopartículas magnéticas verdes con ozono obteniendo un porcentaje de 87%, siendo el más alto en comparación con los análisis expuestos en la tabla 14 del presente.
- Con base a la caracterización de la magnetita se evidenció que la metodología usada para sintetizar las nanopartículas fue correcta debido a que se obtuvo el mismo patrón en los mismos ángulos en el análisis cristalográfico teórico para la presencia de magnetita. Simultáneamente se comprobó la existencia de una estructura atómica de espinela inversa, así como la ausencia de un bucle de histéresis magnética y una alta magnetización de saturación de 82.67 emu/g.
- Se demostró por espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier, que el enlace entre adsorbato y adsorbente fue debido al grupo funcional tiol presente en la cisteína.
- Se demostró que las Cys@MNPs sintetizadas presentan una baja capacidad de adsorción en las condiciones trabajadas y que su costo de aplicación es relativamente alto.
- Se analizó el efecto de diferentes variables, donde el pH más adecuado fue 9.5 (zona alcalina), la cinética que más se ajustó fue la de pseudo segundo orden ($r^2 = 0.999$) y las tres isothermas usadas describen el modelo de adsorción, tomando el valor q_m de la ecuación linealizada de Langmuir.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez <u>CÓDIGO: 507899</u> Natalia Valero <u>CÓDIGO: 507379</u>
		DIRECTOR: <u>PhD. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR.</u> Directortrabajo de grado


RECOMENDACIONES

- Buscar alternativas que complementen el uso de la ozonización catalítica como pretratamiento, antes del tratamiento biológico en ámbitos industriales para economizar su desarrollo.
- Realizar los cálculos y ensayos de laboratorios usando una mayor concentración inicial.
- Conocer el caudal a tratar y concentración aproximada del contaminante para hacer el cálculo de la masa de material adsorbente necesario.
- Utilizar agua residual textil existente en una fuente hídrica contaminada para obtener resultados más aproximados de remoción.
- Dar a conocer a la comunidad por medio de publicidad (cartillas que los niños entiendan, folletos, noticias, entre otras) las consecuencias en la salud de las personas debida a la exposición a elevadas concentraciones del colorante. Asimismo, ilustrar el daño por ecotoxicidad.
- Aprovechar la tecnología para transferir los resultados de la investigación a través de medios virtuales, visuales, gratuitos y al alcance de la comunidad.
- Apropiarse de los resultados y análisis de la investigación siempre y cuando se respete la originalidad y autenticidad de las autoras. Teniendo en cuenta que el documento se transfiere por medio de la base de datos de la biblioteca de la Universidad Católica de Colombia.
- Exigir el cumplimiento de normativas ambientales en las que se haga tratamiento del agua residual textil antes de verterlo en cuencas hídricas.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379 DIRECTOR: Ph.D. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR, Directortrabajo de grado
--	--	---

REFERENCIAS

- ACNUR Comité Español. (2019). *Escasez de agua en el mundo: causas y consecuencias*. La Agencia de La ONU Para Los Refugiados Comité Español. https://eacnur.org/blog/escasez-agua-en-el-mundo-tc_alt45664n_o_pstn_o_pst/#:~:text=Existen diversas causas que producen, La sequía.
- ACNUR Comité Español. (2019). *Escasez de agua en el mundo: causas y consecuencias*. UNHCR ACNUR La Agencia de La ONU Para Los Refugiados Comité Español. https://eacnur.org/blog/escasez-agua-en-el-mundo-tc_alt45664n_o_pstn_o_pst/#:~:text=Existen diversas causas que producen, La sequía
- Albis, A., López, A., & Romero, M. (2017). Remoción de azul de metileno de soluciones acuosas utilizando cáscara de yuca (*Manihot esculenta*) modificada con ácido fosfórico. *Prospectiva*, 15, 60–73.
- Almazan, J. (2016). *Síntesis de nanopartículas de magnetita caracterizadas por espectroscopia Mossbauer* [Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/65705/TESISMCMJonathan.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Angulo, L., & Molina, J. D. (2020). *Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales provenientes de curtiembre con carbón activado modificado con nanopartículas magnetizadas*. Universidad Católica de Colombia.
- Annuar, A., Mat, N., Muhammad, R., Jafaar, J., & Marbelia, L. (2020). Improved bubbling for membrane fouling control in filtration of palm oil mill effluent anaerobic digester sludge. *ScienceDirect*, 36. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101350>
- Aquae fundación. (2020). *¿Qué es el agua?: tipos, composición y funciones*. La Fundación Del Agua. <https://www.fundacionaquae.org/que-es-el-agua/>
- Bae, M., Lee, H., Yoo, K., & Kim, S. (2021). Copper(I) selective chemisorption on magnetite (Fe₃O₄) over gold(I) ions in chloride solution with cyanide. *Hydrometallurgy*, 201, 105560. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105560>
- Basu, M., Guha, A. K., & Ray, L. (2017). Adsorption of Lead on Cucumber Peel. *Journal of Cleaner Production*, 151, 603–615. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.028>
- Belver, C., Bedia, J., Garzon, M., Ramos, V., Gomez, A., & Rodriguez, J. (2020). Advanced Oxidation Process. *ScienceDirect*, 41–98. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818334-2.00003-1>
- Bes Monge, S., Silva, A., & Bengoa, C. (2018). *Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales* (RED TRITÓN 316RT0508 (ed.)). PROGRAMA CYTED. http://www.cytcd.org/sites/default/files/manual_sobre_oxidaciones_avanzadas_0.pdf
- Brito, N., Betancourt, P., & Rodríguez, D. (2010). Ozonación de fenol en soluciones acuosas

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379 DIRECTOR: Ph.D. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR. Directortrabajo de grado
--	--	---

empleando magnetita como catalizador en sistemas ozono y ozono-radiación ultravioleta. *Scielo*, 25(0798–4065).
http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652010000200012

Carpenter, D. (2011). Health effects of persistent organic pollutants: the challenge for the Pacific Basin and for the world. *Degruyter*, 26(1).
<https://www.degruyter.com/view/journals/reveh/26/1/article-p61.xml>

Carrillo, Y., & Herrera, J. (2019). *Remoción de azul de metileno de cuerpos de agua utilizando nanopartículas magnéticas Fe₃O₄*. Universidad Católica de Colombia.

Castellar, G., Angulo, E., Zambrano, A., & Charris, D. (2013). Equilibrio de adsorción del colorante azul de metileno sobre carbón activado. *Revista U.D.C.A Act. & Div. Cient.*

Castro, L., & Herrera, E. (2013). Degradación y decoloración de agua contaminada con colorantes textiles mediante procesos de oxidación avanzada. *Revistas TEC*, 27, 40–50.
<https://doi.org/https://doi.org/10.18845/tm.v27i2.1807>

Ceretta, M., Vieira, Y., Wolski, E., Foletto, E., & Silvestri, S. (2020). Biological degradation coupled to photocatalysis by ZnO/polypyrrole composite for the treatment of real textile wastewater. *ScienceDirect*, 35(101230). <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101230>

Chaparro, C., Cabanzo, R., & Mejia, E. (2014). ESTUDIO DE LA ADSORCIÓN DE AZUL DE METILENO SOBRE ÓXIDO DE GRAFENO. *Revista Colombiana de Materiales* N.5, 131–139. <https://doi.org/2256-1013>

Chen, H., Deng, X., Ding, G., & Qiao, Y. (2019). The synthesis, adsorption mechanism and application of polyethyleneimine functionalized magnetic nanoparticles for the analysis of synthetic colorants in candies and beverages. *Food Chemistry*, 293, 340–347.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.04.111>


Chico, D., Aldaya, M., & Garrido, A. (2014). *¿Cuánta agua requiere la confección de un pantalón vaquero?*
https://www.upm.es/UPM/SalaPrensa/Noticias?fmt=detail&prefmt=articulo&id=e05b276248673410VgnVCM10000009c7648a_____

Clemente, P. (2008). *Aplicación de procesos de oxidación avanzada (Fotocatálisis solar) para el tratamiento y reutilización de efluentes textiles*.
<http://hdl.handle.net/10251/2241>

Coates, J. (2006). Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach. *Wiley Online Library*,
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/9780470027318.a5606>

Cuando Cerón, C. E. (2013). *Medición en línea de contaminantes en aguas residuales de la industria textil durante su tratamiento químico*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Denchak, M. (2018). *Water Pollution: Everything You Need to Know*. NRDC.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379
		DIRECTOR: Ph.D. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR. Directortrabajo de grado


<https://www.nrdc.org/stories/water-pollution-everything-you-need-know#whatis>

- Doğan, M., Abak, H., & Alkan, M. (2009). Adsorption of methylene blue onto hazelnut shell: Kinetics, mechanism and activation parameters. *Journal of Hazardous Materials*, 164(1), 172–181. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.155>
- Doğan, M., Alkan, M., Türkyilmaz, A., & Özdemir, Y. (2004). Kinetics and mechanism of removal of methylene blue by adsorption onto perlite. *Journal of Hazardous Materials*, 109(1–3), 141–148. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.03.003>
- Du, J., & Zhang, B. (2020). Decontamination of heavy metal complexes by advanced oxidation processes: A review. *Chinese Academy of Medical Sciences*. <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.javeriana.edu.co/science/article/pii/S1001841720304502>
- Elwakeel, K. Z., & Guibal, E. (2015). Selective removal of Hg(II) from aqueous solution by functionalized magnetic-macromolecular hybrid material. *Chemical Engineering Journal*, 281, 345–359. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.05.110>
- Erkan, H., Çağlak, A., Soysaloglu, A., Takatas, B., & Engin, O. (2020). Performance evaluation of conventional membrane bioreactor and moving bed membrane bioreactor for synthetic textile wastewater treatment. *ScienceDirect*, 38. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101631>
- Fernandez, C., & Suárez, R. (2020). *Agua que no has de beber*. EL TIEMPO. <https://www.eltiempo.com/salud/como-es-la-calidad-del-agua-en-colombia-340578>
- Gabelman, A. (2017). Crossflow Membrane Filtration Essentials. *ProQuest*, 4. <https://search-proquest-com.ezproxy.javeriana.edu.co/sciencejournals/docview/1889744197/8A826138D85C4E0DPQ/2?accountid=13250>
- Gleick, P. (1993). *Recursos mundiales de agua dulce*. Agua En Crisis: Una Guía Para Los Recursos de Agua Dulce Del Mundo. <https://cienciaencanoa.blogspot.com/2012/05/cuanta-agua-hay-dentro-sobre-y-por.html>
- Gomez, N. (2012). “*Recubrimientos mesoporosos y mesoestructurados de TiO₂-anatasa por el método sol-gel para aplicaciones en sistemas fotocatalíticos*.” <https://pdfs.semanticscholar.org/43ce/d3fa88386ac5ccd9422da60f6f28f574e605.pdf>
- Gonzalez, C. (2006). *¿Qué es la ley de agua limpia?* Agricultura.Uprm. <http://agricultura.uprm.edu/escorrentia/index.html>
- Grimlat, J. (2013). *Los compuestos orgánicos persistentes en la biosfera: el enemigo global e invisible*. Metode. <https://metode.es/revistas-metode/monograficos/los-compuestos-organicos-persistentes-en-la-biosfera-el-enemigo-global-e-invisible.html>
- Guaypatin, J. (2020). *Estudio de la cinética de adsorción y desorción de colorantes aniónico y catiónico usando una arcilla con altos contenidos de hierro*. <https://doi.org/UNACH->

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379 DIRECTOR: Ph.D. WILFREDO MARIMON BOLIVAR. Directortrabajo de grado
--	--	---


FI-AMB

- Hamdaoui, O., & Naffrechoux, E. (2007). Modeling of adsorption isotherms of phenol and chlorophenols onto granular activated carbon. Part I. Two-parameter models and equations allowing determination of thermodynamic parameters. *Journal of Hazardous Materials*, 147(1–2), 381–394. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.021>
- Hameed, B. H., Din, A. T. M., & Ahmad, A. L. (2007). Adsorption of methylene blue onto bamboo-based activated carbon: Kinetics and equilibrium studies. *Journal of Hazardous Materials*, 141(3), 819–825. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.07.049>
- Heng, Z., Yongli, H., Leiduo, L., Gang, Y., & Bo, L. (2020). Catalytic ozonation of Bisphenol A in aqueous solution by Fe₃O₄–MnO₂ magnetic composites: Performance, transformation pathways and mechanism. *ScienceDirect*, 245. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116449>
- Ibañez, J. (2015). *Contaminación del Suelo y Salud Pública (Global Soil Forum)*. Madrimasd, Blogs. <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2015/02/20/146182>
- Jimenez, N. (2016). *Bioquímica del estrés oxidativo en Vegetales*. Slideplayer. <https://slideplayer.es/slide/9092566/>
- Kosmulski, M. (2004). pH-dependent surface charging and points of zero charge II. Update. *Journal of Colloid and Interface Science*, 275(1), 214–224. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.02.029>
- Lobna, M., Chedly, T., Geissen, S., & Latifa, B. (2019). A comparative study on ozone, hydrogen peroxide and UV based advanced oxidation processes for efficient removal of diethyl phthalate in water. *ScienceDirect*, 363, 401–411. <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.javeriana.edu.co/science/article/pii/S0304389418308938>
- Mamani, J. B., Costa-Filho, A. J., Cornejo, D. R., Vieira, E. D., & Gamarra, L. F. (2013). Synthesis and characterization of magnetite nanoparticles coated with lauric acid. *Materials Characterization*, 81, 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2013.04.001>
- Marimon, W. (2018). SÍNTESIS VERDE Y CARACTERIZACIÓN DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS (MNPs). In *INGENIERÍA DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN AGUAS*. (pp. 32–36). Pontificia Universidad Javeriana. <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/39649/Documento.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mata-Miranda, M. M., Guerrero-Robles, C. I., Rojas-López, M., Delgado-Macuil, R. J., González-Díaz, C. A., Sánchez-Monroy, V., Pérez-Ishiwara, D. G., & Vázquez-Zapién, G. J. (2017). *Componentes Principales mediante Espectroscopia FTIR como Técnica de Caracterización Innovadora durante la Diferenciación de Células Madre Pluripotentes a Células Pancreáticas Principal Components by FTIR Spectroscopy as Innovative Characterization Technique during Differentiation of Pluripotent Stem Cells*


 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379
		DIRECTOR: Ph.D. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR, Directortrabajo de grado

to *Pancreatic Cells*. 38(1), 225–234. <https://doi.org/10.17488/RMIB.38.1.17>


- Mazille, F. (2020). *Advanced Oxidation Processes*. SSWM. <https://sswm.info/sswm-university-course/module-6-disaster-situations-planning-and-preparedness/further-resources-0/advanced-oxidation-processes>
- RESOLUCIÓN 1207 DE 2014, 12 (2014). <http://parquearvi.org/wp-content/uploads/2016/11/Decreto-1207-de-2014.pdf>
- Moreno, H. S., & Romero, J. C. (2019). *Implementación de nanopartículas de arcilla modificada magnéticamente para la potabilización de agua proveniente del río Cuja*. Universidad Católica de Colombia.
- Nacho. (2016). *MAGNETITA*. ROCAS Y MINERALES. <https://www.rocasminerales.net/magnetita/>
- Nathanson, J. (2020). *Wastewater treatment*. Encyclopædia Britannica, Inc. <https://www.britannica.com/technology/wastewater-treatment/Oxidation-pond>
- NOAA. (2020). *Water cycle*. National Oceanic and Atmospheric Administration. <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/freshwater/water-cycle#:~:text=The water cycle shows the,form of rain and snow.>
- Noval, V., Ochoa, C., & Carriazo, J. (2016, September). Magnetita (Fe₃O₄): Una estructura inorgánica con múltiples aplicaciones en catálisis heterogénea. *Revista Colombiana de Química*. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcolquim/article/view/62831/63826#:~:text=Ma gnetita como catalizador en síntesis,a sus propiedades óxido-reductivas>
- Noyola, Adalberto; Morgan, J. G. L. (2013). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales*.
- Organización Mundial de la Salud. (2006). *Guías para la calidad del agua potable* (OMS (ed.); 3rd ed.). Ediciones de la OMS. https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowres.pdf?ua=1
- Pérez, A., Andrade, E., & Zambrano, T. (2018). Ozonización De Residuos Líquidos Textiles Para Remoción De Sólidos Suspendidos Totales, Demandas Química Y Bioquímica De Oxígeno, Grasas Y Aceites. *European Scientific Journal*, 14, 8. <https://doi.org/10.19044/esj.2018.v14n3p40>
- Plazinski, W., Dziuba, J., & Rudzinski, W. (2013). *Modeling of sorption kinetics: the pseudo-second order equation and the sorbate intraparticle diffusivity*. <https://doi.org/10.1007/s10450-013-9529-0>
- Radon, A., Łoński, S., & Babilase, R. (2020). Influence of magnetite nanoparticles surface dissolution, stabilization and functionalization by malonic acid on the catalytic activity, magnetic and electrical properties. *ScienceDirect*, 607(125446). <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125446>

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379
		DIRECTOR: PhD. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR. Directortrabajo de grado

- Rafiul, I. (2020). *Water pollution due to textile industry*. Textiletoday. <https://www.textiletoday.com.bd/water-pollution-due-textile-industry/#:~:text=Cotton is a major raw,contaminate the surrounding water bodies.>
- Ramos, F., & Blanco, B. (2017). *DECOLORACIÓN Y DEGRADACIÓN DE AZUL DE METILENO PRESENTE EN AGUA* [Universidad Libre de Colombia]. [https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/11182/TRABAJO DE GRADO_Fernando Ramos y Brayan Banco_CorreccionesJunio.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/11182/TRABAJO_DE_GRADO_Fernando_Ramos_y_Brayan_Banco_CorreccionesJunio.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Remtavares. (2008). *Aplicación de la ozonización en el tratamiento de aguas: descripción y funcionamiento*. Madrimasd, Blogs. [https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2008/01/16/82477#:~:text=La ozonización es ampliamente utilizada,aguas%2C tanto potables como residuales.&text=El método más ampliamente utilizado,eléctricas silenciosas” \(Figura\).](https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2008/01/16/82477#:~:text=La ozonización es ampliamente utilizada,aguas%2C tanto potables como residuales.&text=El método más ampliamente utilizado,eléctricas silenciosas” (Figura).)
- Rodriguez, E. (2018). *Eliminación de microcontaminantes orgánicos presentes en aguas residuales urbanas mediante MBR combinado con ozidación avanzada y con filtración por membranas* [Universidad de Alicante]. https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/80430/1/tesis_edgardo_david_vasquez_rodrieguez.pdf
- TWI. (2020). *WHAT ARE NANOPARTICLES? DEFINITION, SIZE, USES AND PROPERTIES*. The Welding Institute. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-are-nanoparticles>
- UN environment programme. (2019). *Stockholm Convention*. The Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. <http://www.pops.int/TheConvention/Overview/tabid/3351/Default.aspx>
- WHO. (2020). *Persistent organic pollutants (POPs)*. World Healt Organization. https://www.who.int/foodsafety/areas_work/chemical-risks/pops/en/
- Wu, K. H., Huang, W. C., Hung, W. C., & Tsai, C. W. (2021). Modified expanded graphite/Fe₃O₄ composite as an adsorbent of methylene blue: Adsorption kinetics and isotherms. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 266, 115068. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2021.115068>
- Yang, S. T., Chen, S., Chang, Y., Cao, A., Liu, Y., & Wang, H. (2011). Removal of methylene blue from aqueous solution by graphene oxide. *Journal of Colloid and Interface Science*, 359(1), 24–29. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.02.064>

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL		ELABORÓ: Yesica Ramírez CÓDIGO: 507899 Natalia Valero CÓDIGO: 507379
		DIRECTOR: PhD. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR, Directortrabajo de grado

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 COMBINACIÓN DE OZONO Y NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS VERDES PARA LA DEGRADACIÓN DE 4-CLOROFENOL Y DICLOFENACO EN AGUA RESIDUAL SINTÉTICA TEXTIL.

IDENTIFICACIÓN DE LOS SOLICITANTES DE TIEMPO DE LABORATORIO:			
CÓDIGO	NOMBRES Y APELLIDOS	E-MAIL @ucatolica.edu.co	TELÉFONO
507899	Yesica Liliana Ramírez Salazar	yIramirez99@ucatolica.edu.co	3134753963
507379	Lizeth Natalia Velero	lnvelero79@ucatolica.edu.co	3133590316

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/A A)	HORA INICIO (1) (HH:M M)	HORA FIN (1) (HH:M M)	FECHA (dd/mm/A A)	HORA INICIO (1) (HH:M M)	HORA FIN (1) (HH:M M)		
1	09/11/2020- 16/11/2020	8:00AM	10:00AM	09/11/2020- 16/11/2020	8:00AM	10:00AM	D	Síntesis muestra sintética
2	17/11/2020	8:00AM	10:00AM	17/11/2020	4:00PM	6:00PM	D	Color y pH
3	18/11/2020	8:00 AM	10:00AM	18/11/2020	4:00PM	6:00PM	D	Turbiedad
4	19/11/2020	8:00 AM	10:00AM	19/11/2020	4:00PM	6:00PM	D	Sólidos
5	20/11/2020	8:00 AM	10:00AM	20/11/2020	4:00PM	6:00PM	D	DQO
6	21/11/2020	8:00 AM	10:00AM	21/11/2020	4:00PM	6:00PM	D	DBO
7	23/11/2020	8:00 AM	10:00AM	23/11/2020	4:00PM	6:00PM	D	Fosfatos
8	24/11/2020	8:00 AM	10:00AM	24/11/2020	4:00PM	6:00PM	D	Nitratos
9	25/11/2020	8:00 AM	10:00AM	25/11/2020	4:00PM	6:00PM	D	Fosforo total
10	26/11/2020	8:00 AM	10:00AM	26/11/2020	4:00PM	6:00PM	D	Nitrógeno amoniacal
11	27/11/2020- 09/12/2020	8:00 AM	10:00AM	27/11/2020- 09/12/2020	4:00PM	6:00PM	D	Síntesis nanopartículas
12	09/12/2020- 20/12/2020	8:00 AM	10:00AM	09/12/2020- 20/12/2020	4:00PM	6:00PM	D	Implementación de tratamientos

(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	UN D	CAN T	A CARGO:	
			LAB	USU
Espectrofotómetro		1	X	
Ozonizador con fuente de aire		1	X	
Reactor con capacidad 1L		1	X	
Reactor fotocatalítico con lámpara UV de mercurio capacidad de 1 L		1	X	
Agitador mecánico		1	X	
Test de jarras		1	X	
Horno de secado		1	X	
Cloruro de hierro	mg/L			X
L- glutatión	mg/L			X
Tiosulfato de sodio	mg/L			X
Reactivos para muestra sintética	mg/L			X

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).

SOLICITANTE 1**SOLICITANTE 2****SOLICITANTE 4****SOLICITANTE 5**

DOCENTE / TUTOR ENCARGADO

COORDINADOR DE LABORATORIOS