

**Tratamiento Biotecnológico de Aguas Contaminadas con Hierro: Hacia un
Modelo Integrado para la Minería en Samacá, Boyacá**



Laura Natalia Patiño Gómez

**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS-SECCIONAL TUNJA
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL
TUNJA – BOYACÁ**

2025

**Tratamiento Biotecnológico de Aguas Contaminadas con Hierro: Hacia un
Modelo Integrado para la Minería en Samacá, Boyacá**



Laura Natalia Patiño Gómez.

**Proyecto de investigación para optar por el título de:
INGENIERO AMBIENTAL**

Director:

M.Sc. Edinson Fabian Monroy Ávila

**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS-SECCIONAL TUNJA
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL
TUNJA – BOYACÁ**

2025

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios por ser mi guía en todo este camino académico, por permitirme conocer sobre realidad de la vida, los verdaderos amigos y sobre la resiliencia, ya que pese a las dificultades siempre existió una luz universal que me demostró que no siempre son fáciles las cosas pero que vale la pena luchar por lo que realmente se desea, así mismo dedico esta investigación a mi familia dado que sin ellos estar en esta universidad y cursar cada semestre hubiera sido imposible.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios primeramente por ser quien lleno de sabiduría mi proceso personal y académico, a mi padre Jairo Alonso Patiño quien fue la persona que me dio como herencia el estudio con mucho sacrificio, pero un sacrificio lleno de amor hacia su hija lo cual le agradezco de todo corazón, reitero que esta investigación no es más que el reflejo de todo el conocimiento que gracias a él logre adquirir, así mismo a cada uno de los docentes que me inculcaron el amor por la investigación, a mi Director de tesis Fabian Monroy por estar presente en este proceso y más que un docente ser un amigo, agradezco inmensamente a aquellos que pese a todas las dificultades no dejaron de apoyarme y creer en mí, de igual manera a mi novio David Diaz, por ser parte esencial en este proceso debido a su apoyo incondicional y desinteresado, a sus palabras de aliento y llenas de ternura que me motivaron cada día, por ultimo y no menos importante agradezco a mi madre Milena Gómez, a mis tías, abuelita, hermanos, y demás seres queridos que estuvieron presentes en todo este camino, el cual apenas comienza.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	11
ABSTRACT	12
INTRODUCCIÓN	13
1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	15
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	15
1.1.1. Pregunta de investigación	16
1.1.2. Delimitación del lugar.....	16
1.2. JUSTIFICACIÓN	18
1.3. OBJETIVOS	19
1.3.1. Objetivo general.....	19
1.3.2. Objetivos específicos	19
2. MARCO TEÓRICO.....	20
2.1. ESTADO DEL ARTE.....	23
2.1.1. Tipos de humedales artificiales	29
2.1.1.1. Humedal artificial de flujo superficial:	29
2.1.1.2. Humedal artificial de flujo subsuperficial:.....	30
2.1.1.3. Humedal artificial subsuperficial vertical y horizontal:.....	30
2.1.2. Tipos de plantas para humedales artificiales con capacidad de remoción de hierro. 31	31
2.1.2.1. Scirpus californicus:.....	31
2.1.2.2. Eichhornia Crassipes:.....	32
2.1.2.3. Phragmites australis:	32
2.1.2.4. Hydrocotyle Umbellata:	33
2.1.2.5. Juncus Effusus Juncus:.....	33
2.1.2.6. Carex Lasiocarpa:.....	34
2.1.2.7. Iris Pseudacorus:	34

2.1.2.8.	Schoenoplectus Californicus.....	35
2.1.3.	Tipos de bacterias con capacidad de remoción de hierro.....	36
2.1.3.1.	Acidithiobacillus ferrooxidans:.....	36
2.1.3.2.	Thiobacillus denitrificans:.....	36
2.1.3.3.	Otras bacterias:.....	36
2.1.4.	Tipos de biorreactor.	37
2.1.4.1.	Biorreactor continuo:	38
2.1.4.2.	Biorreactor Discontinuo:	38
2.1.5.	Tipos de tratamientos para la remoción de hierro en vertimientos mineros. ...	38
2.1.5.1.	Tratamiento de oxidación química, precipitación y filtración:	38
2.1.5.2.	Tratamiento de intercambio iónico mediante ablandamiento por zeolita:	39
2.1.5.3.	Tratamiento basado en materiales de carbonato de calcio:	40
2.2.	MARCO LEGAL	40
3.	DISEÑO METODOLÓGICO	42
3.1.	CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS MINERAS DE SAMACÁ BOYACÁ 42	
3.2.	MUESTREOS	43
3.3.	ANÁLISIS PARA LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DE CALIDAD DEL AGUA EN 5 PUNTOS MINEROS DE SAMACÁ, BOYACÁ.	45
3.3.1.	Medición en el multiparámetro.	45
3.3.2.	Demanda química de oxígeno.....	46
3.3.3.	Demanda Biológica de Oxígeno	48
3.3.4.	Medición Solidos Sedimentables	50
3.3.5.	Medición con kits de hierro.....	51
3.4.	DISEÑO DE PROTOTIPOS.....	52
3.4.1.	Diseño del prototipo de humedal artificial.....	52
3.4.2.	diseño del prototipo de biorreactor	52
3.5.	CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO	53
3.5.1.	Construcción de humedal artificial	53
3.5.2.	Construcción del biorreactor	54
3.6.	SELECCIÓN DEL MICROORGANISMO.....	54
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	55

4.1.	ANÁLISIS PARA LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DE CALIDAD DEL AGUA EN 3 PUNTOS MINEROS DE SAMACÁ, BOYACÁ.	55
4.2.	DISEÑO DE LOS PROTOTIPOS	62
4.2.1.	Diseño del prototipo de humedal artificial.....	62
4.2.2.	Diseño del prototipo de biorreactor.....	67
4.3.	CONSTRUCCIÓN DE LOS PROTOTIPOS	69
4.3.1.	Construcción del humedal artificial	69
4.3.2.	Construcción de biorreactor	71
4.4.	BALANCE DE MASAS DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO.....	75
4.4.1.	Cálculos para el primer filtro del humedal artificial	75
4.4.2.	Cálculos para el segundo filtro del humedal artificial	78
4.4.3.	Cálculos para la última cámara del humedal artificial.	79
4.4.4.	Datos tomados para la última cámara del humedal artificial.	79
4.4.5.	Cálculos para el biorreactor	79
4.5.	ANÁLISIS PARA LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS POSTERIOR AL TRATAMIENTO.....	83
4.6.	ANÁLISIS DE REMOCIÓN DE HIERRO DEL SISTEMA INTEGRADO POR HUMEDAL ARTIFICIAL Y BIORREACTOR.	90
5.	IMPACTO SOCIAL Y HUMANISTICO DEL PROYECTO.....	92
6.	CONCLUSIONES	93
7.	RECOMENDACIONES	94
	REFERENCIAS	95
	ANEXOS.....	104

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
<i>Tabla 1. Marco legal de la investigación.....</i>	40
<i>Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos muestra número 1.</i>	55
<i>Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos muestra número 2.</i>	57
<i>Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos muestra número 3.</i>	58
<i>Tabla 5. Parámetros fisicoquímicos muestra número 4.</i>	59
<i>Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos muestra número 5.</i>	61
<i>Tabla 7. Parámetro de pH antes y después del tratamiento.</i>	83
<i>Tabla 8. Parámetro de Porcentaje de Oxígeno Disuelto antes y después del tratamiento.</i>	85
<i>Tabla 9. Parámetro de Oxígeno Disuelto antes y después del tratamiento.</i>	86
<i>Tabla 10. Parámetro de conductividad antes y después del tratamiento.</i>	87
<i>Tabla 11. Parámetro de Solidos Disueltos Totales antes y después del tratamiento.</i>	88
<i>Tabla 12. Parámetro de Temperatura antes y después del tratamiento.</i>	89
<i>Tabla 13. Parámetro de Solidos Suspendidos Totales antes y después del tratamiento.</i>	89
<i>Tabla 14. Parámetros de hierro.</i>	90

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1. Ubicación del municipio de Samacá Boyacá.....</i>	17
<i>Figura 2. Clasificación de áreas de la minería y títulos de minería en Samacá, Boyacá. ..</i>	42
<i>Figura 3. Puntos de muestreos de agua en el municipio de Samacá, Boyacá.....</i>	44
<i>Figura 4. Medición de la muestra de agua minera en el multiparámetro.</i>	46
<i>Figura 5. Medición de la demanda química de oxígeno de la muestra de agua.</i>	48
<i>Figura 6. Medición de la demanda biológica de oxígeno de la muestra de agua.</i>	50
<i>Figura 7. Medición solidos sedimentables de la muestra de agua.</i>	51
<i>Figura 8. Medición de la concentración de hierro de la muestra de agua.</i>	52
<i>Figura 9. Diseño del humedal artificial en vista isométrica.</i>	62
<i>Figura 10. Diseño de humedal artificial en vista perfil.</i>	63
<i>Figura 11. Diseño del humedal artificial en vista planta.</i>	64
<i>Figura 12. Ilustraciones del humedal artificial.</i>	65
<i>Figura 13. Vista isométrica del humedal artificial.....</i>	66
<i>Figura 14. Diseño de biorreactor en vista isométrica.</i>	67
<i>Figura 15. Diseño de biorreactor vista perfil.</i>	68
<i>Figura 16. Diseño de biorreactor en vista planta.....</i>	69
<i>Figura 17. Prototipo del humedal artificial.....</i>	70
<i>Figura 18. Organización de las plantas en el humedal artificial.</i>	71
<i>Figura 19. Organización de los complementos del biorreactor.....</i>	72
<i>Figura 20. Construcción del biorreactor.....</i>	73
<i>Figura 21. Incorporación de las bacterias.</i>	74
<i>Figura 22. Balance de masas para el sistema de tratamiento integrando de humedal artificial y biorreactor.....</i>	80
<i>Figura 23. Remoción de hierro en función del tiempo y pH.....</i>	82
<i>Figura 24. Gráfica del parámetro de pH antes y después del tratamiento.</i>	84
<i>Figura 25. Porcentaje de Oxígeno Disuelto antes y después del tratamiento.....</i>	85
<i>Figura 26. Oxígeno Disuelto antes y después del tratamiento.</i>	86
<i>Figura 27. conductividad antes y después del tratamiento.....</i>	87
<i>Figura 28. Solidos Disueltos Totales antes y después del tratamiento.....</i>	88
<i>Figura 29. Solidos Suspendidos Totales antes y después del tratamiento.....</i>	90
<i>Figura 30. Concentración del hierro antes y después del tratamiento.....</i>	91

ANEXOS

Pág.

<i>Anexo 1. Ponencia Internacional, XVII Congreso de Estudiantes de Ingeniería, Cancún México año 2023, titulado: EXTRACCIÓN DEL HIERRO A PARTIR DE HEMATITA MEDIANTE EL USO DE BACTERIAS.</i>	104
<i>Anexo 2. Ponencia Internacional 3er Congreso Internacional de Objetivos de Desarrollo Sostenible del año 2024, titulado: Tendencias de la investigación sobre la biorremediación de metales pesados en aguas residuales utilizando microorganismos.</i>	105
<i>Anexo 3. Ponencia Internacional y Evidencia Memorias del 2do Congreso Internacional Objetivos de Desarrollo Sostenible año 2022, titulado: Extracción del Hierro a partir de Hematita Mediante el Uso de Bacterias.</i>	106
<i>Anexo 4. Ponencia Internacional 1er Encuentro Internacional de Proyectos de Ingeniería y Procesos Sostenibles año 2025, titulado: Tratamiento Biotecnológico de Aguas Mineras Contaminadas con Hierro en Samacá, Boyacá.</i>	107
<i>Anexo 5. Ponencia Internacional Congreso Internacional de Departamentos Académicos Resolución 4.0 y Crisis ecológica: Retos para la educación del Siglo XXI, 2021. ...</i>	107
<i>Anexo 6. Ponencia Encuentro Ingenio Ambiental- Exposición de Poster de Investigación, 2021.</i>	108
<i>Anexo 7. Reconocimiento San Alberto Magno como Estudiante Líder en Investigación. .</i>	108

RESUMEN

En la presente investigación se propuso un modelo biotecnológico integrado, esto para el tratamiento de aguas contaminadas con hierro, generadas por vertimientos provenientes de la actividad minera en el municipio de Samacá, Boyacá. Reconociendo que la alta concentración de metales pesados, en especial del metal hierro resultante de la minería de carbón, ha generado diversos impactos sobre el recurso hídrico, lo que podría tener afectación en la biodiversidad, la salud humana y en la actividad agropecuaria del municipio.

De acuerdo con lo anterior como solución a esta problemática, se diseñó e a su vez implementó un sistema integrado por humedal artificial y biorreactor bacteriano, donde se combinan los procesos de fitorremediación y de biorremediación. Para esto se realizó la caracterización fisicoquímica de las aguas residuales mineras, la selección de especies vegetales y de microorganismo para este caso fue bacterias con alta capacidad de remoción de hierro, y la construcción de prototipos funcionales. Donde los resultados experimentales demostraron una eficiencia evidente frente a la disminución de la concentración de hierro y la mejora de parámetros esenciales como el pH, sólidos totales y el oxígeno disuelto. Así mismo el enfoque propuesto muestra que es ambientalmente sostenible y a su vez viable técnica y económicamente esto para su aplicación en regiones rurales afectadas por la minería, de igual manera esta investigación aportó una evidencia científica y técnica sobre el potencial de tecnologías basadas en sistemas naturales, promoviendo así una minería más responsable.

ABSTRACT

This research proposes an integrated biotechnological model for the treatment of iron-contaminated water generated by mining wastewater in the municipality of Samacá, Boyacá. Recognizing that the high concentration of heavy metals, especially iron from coal mining, has generated various impacts on water resources, which could affect biodiversity, human health, and agricultural activities in the municipality.

Based on the above, as a solution to this problem, a system comprising an artificial wetland and a bacterial bioreactor was designed and implemented, combining phytoremediation and bioremediation processes. For this purpose, the mining wastewater was physicochemically characterized, plant species were selected, and functional prototypes were built. The experimental results demonstrated clear effectiveness in reducing iron concentration and improving essential parameters such as pH, total solids, and dissolved oxygen. The proposed approach also demonstrates its environmental sustainability and technical and economic viability for application in rural regions affected by mining. This research also provided scientific and technical evidence on the potential of technologies based on natural systems, thereby promoting more responsible mining.

INTRODUCCIÓN

La actividad minería a nivel mundial desempeña un papel crucial principalmente en la economía ya que esta suministra minerales esenciales al igual que materias primas que son importantes para la industria porque abarcan desde la tecnología hasta la infraestructura, pero por consecuencia este sector también se asocia con una grave degradación ambiental, al igual que desplazamiento social e incluso desigualdades económicas. De acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2025), la minería aporta la mitad de todas las emisiones globales de gases de efecto invernadero y de igual manera es responsable del 80 % de la pérdida de biodiversidad. Mientras que la Organización Internacional del Trabajo (OIT, 2025), advierte que más de un millón de personas laboran en minería a gran escala y millones adicionales en operaciones de minería artesanal y de pequeña escala. Pese a sus ventajas económicas, esta actividad suele generar deforestación, contaminación en las fuentes hídricas y vulnerar los derechos territoriales (Amir Nurmagomedov, 2025).

En el caso de Colombia la minería ha tenido un impacto enorme en los recursos hídricos, esto debido a la contaminación con metales pesados, que son usados usualmente en actividades mineras, así mismo debido a esta actividad en el país se ve una eliminación en los afluentes los mismos que presentan una afectación por la erosión, de igual manera se presenta un deterioro en la fauna y flora que es propia de dichos ecosistemas, por otra parte la deforestación en montañas que son pertenecientes a paramos en donde se genera la producción hídrica más grande del país, un ejemplo claro de este fenómeno es la lucha constante para la protección del páramo de Santurbán (Leonardo Güiza Suárez, 2011)

Por otra parte, la actividad minera en el departamento de Boyacá específicamente en el municipio de Samacá se ha considerado como fuente esencial para el desarrollo económico, pero también esta misma ha generado diversos impactos ambientales sobre todo en la calidad del agua, así mismo según Pardo & Gonzales (2011), se ha evidenciado que muchos de los afluentes cercanos a las minas presentan niveles preocupantes de pH y de carga contaminante de metales como es el caso del hierro. Esto se debe a que una vez liberados en los ecosistemas,

los metales pueden ser absorbidos por organismos y transferirse a lo largo de las cadenas tróficas, aumentando así su concentración en cada nivel, en un proceso conocido como biomagnificación, incrementando así significativamente la toxicidad de los metales pesados, por ende, afectando la biodiversidad y de igual manera a la actividad productiva agropecuaria de la región y la salud humana (Bazan & Galizia, 2018; Secretaría de Salud de Boyacá., 2017).

Es por esto que en diversos estudios realizados por Delgadillo et al. (2011), se utiliza la fitorremediación la cual se encarga de utilizar plantas acuáticas como *Eichhornia crassipes* o mejor conocido como buchón de agua, para absorber y precipitar metales pesados en las aguas contaminadas. Por otra parte, también se emplea la biorremediación la cual utiliza bacterias como *Acidithiobacillus ferrooxidans*, las cuales son capaces de oxidar hierro y azufre, facilitando así su remoción en el agua (Cota-Ruiz et al., 2018). Así mismo se implementan tecnologías que incrementen estos dos factores ya que han demostrado ser eficaces, sostenibles y de bajo costo, especialmente en países en vías de desarrollo (Silva Barrera, 2019).

Por consiguiente, esta investigación busca implementar un sistema integrado de humedal artificial y biorreactor con el fin de aprovechar los procesos de fitorremediación y biorremediación en los vertimientos mineros del municipio de Samacá, Boyacá.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Cuando se habla de minería se establece como una actividad económica fuerte en Colombia, (Rodríguez Aparicio & Vergara Buitrago, 2021), sin embargo, existen regiones del país donde la minería ha tenido consecuencias enormes como son la disminución de caudales, deterioro en aguas subterráneas y contaminación en las aguas superficiales (IDEAM, 2010), esto se debe a que en muchas de estas regiones los ríos han sido convertidos en vertederos de residuos de la minería, así mismo estas aguas no presentan ningún tipo de tratamiento, lo que en muchos de estos sectores ha provocado una crisis ambiental y sanitaria (Alfonso et al., 2024).

Se puede afirmar que este tipo de consecuencias puede variar según el proceso de extracción y el mineral, pero según diversas investigaciones de aguas en Boyacá estas se encuentran contaminadas con diversos residuos de minería de carbón (Pardo & Gonzales, 2011), donde se han presentado diversos resultados de análisis en la composición química de aguas que son especialmente generadas en procesos de tipo mineros e industriales y de igual manera en afluentes que sean próximos a centros de extracción en el municipio de Samacá (Boyacá), lo cual demostró que muchas de las muestras no estaban dentro de los rangos que se encuentran establecidos por la normatividad para calidad de agua, confirmando así el efecto contaminante de la actividad minera (Rodríguez Aparicio & Vergara Buitrago, 2021).

Por otra parte en muchos de estos vertimientos la categoría de tipo ácido se presentaba como la más frecuente, ya que esta ocurre cuando los sulfuros metálicos permanecen expuestos a todas las características fisicoquímicas del ambiente, como es el caso del oxígeno atmosférico y el agua, lo que genera una variedad de reacciones que causan este tipo de acidez (Barrero, 2014), es por ello que si los sulfuros son expuestos en superficie se termina oxidando y generando un agua ácida y cargada de metaloides, metales pesados y sulfatos (Lottermoser, 2007). Como consecuencia de lo anterior se generan sedimentos con características como el color rojo o naranja debido a la precipitación del hierro, y la vegetación que se encuentra en

contacto con estos vertimientos se ve directamente afectada, ya que el nivel de acidez y concentración de sulfatos y de cloruros impide su crecimiento de manera normal o natural (ARAMBURO & OLAYA, 2012; Jennings et al., 2008).

En virtud de lo anterior el consumo de agua que presenta altos niveles de hierro puede ocasionar también diversas afectaciones a la salud humana como es el caso de los problemas gastrointestinales, entre ellos vómitos, náuseas y dolores abdominales de manera repetitiva, así mismo, la acumulación excesiva del mineral de hierro en el organismo también puede provocar hemocromatosis, la cuál es una condición que hace que el hierro se deposite en órganos vitales, como es el caso del hígado, el corazón, o incluso el páncreas, lo que ocasiona daños de manera permanente (YaliTech, 2025).

Es por ello que se busca implementar un prototipo de humedal artificial y reactor bacteriano para la disminución de metal pesado de hierro en los vertimientos de las aguas en la industria minera en el municipio de Samacá Boyacá, esto con el fin de mitigar la problemática del vertimiento de aguas residuales de empresas mineras de carbón. Comprendiendo que este proyecto posee diversos retos, ya que existen vacíos en el área del conocimiento, debido a los escasos estudios y pocos datos sobre proyectos que se centren en la remoción de hierro mediante sistemas biotecnológicos con reactores bacterianos, lo que aumenta su complejidad, pero también se convierte en una oportunidad para el área de investigación.

1.1.1. Pregunta de investigación

¿Son eficientes los sistemas integrados de humedales artificiales y biorreactores para la remoción de hierro en las aguas provenientes de la minería de carbón en el municipio de Samacá, Boyacá?

1.1.2. Delimitación del lugar

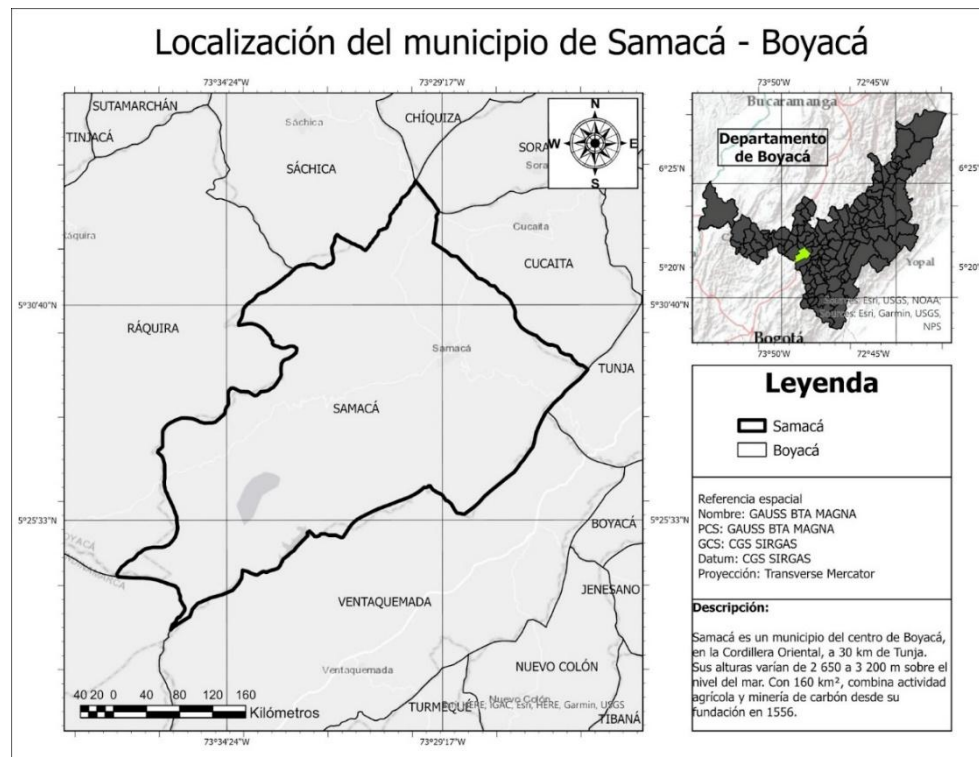
El municipio de Samacá como se observa en la Figura 1 cuenta con una extensión de 172.9 Km², este se encuentra ubicado en el departamento de Boyacá, exactamente a 32 kilómetros de Tunja y 159 Km de Bogotá, así mismo este municipio cuenta con una temperatura de 12 a 16 ° C, de igual manera este se encuentra con una altitud de 2665 msnm, por otra parte el municipio de Samacá goza el privilegio tener diversos accidentes geográficos heterogéneos

como es el caso de sus cerros y colinas, ríos, bosques, numerosas mesetas y serranías interandinas que generan una gran diversidad de actividades económicas (Gobernación y Secretaría de Salud de Boyacá., 2020).

Frente al sector socioeconómico Samacá cuenta con diversas actividades de carácter agrícola donde se centra la siembra de papa, maíz y remolacha, de carácter minero donde se centra la minería de carbón y coquización, y por último una franja turística (Alcaldía Municipal de Samacá., 2019).

Por otra parte, la explotación de minas y canteras, especialmente de carbón, representa en el municipio una de las principales fuentes de empleo y así mismo de ingresos ya que cuenta con 642 empleados y más de cuarenta y cuatro mil millones en ingresos operacionales al año (Cámara de Comercio de Tunja., 2023).

Figura 1. Ubicación del municipio de Samacá Boyacá.



Fuente: Autor.

1.2. JUSTIFICACIÓN

El municipio de Samacá, Boyacá, se caracteriza principalmente por tener una alta actividad minera, especialmente en la extracción de carbón, el cuál ha sido base económica de la región durante años, sin embargo, esta actividad ha generado impactos ambientales, entre ellos la contaminación de cuerpos de agua con hierro y otros metales pesados, esto debido a los vertimientos no tratados o insuficientemente controlados (Ana María Peláez, 2011). Es por ello que en estudios realizados por diversas instituciones se han evidenciado que los afluentes mineros tienden a presentar niveles preocupantes de acidez y dureza extrema, así como elevadas concentraciones de hierro, sulfatos y sólidos disueltos totales, lo que compromete la calidad del agua y la salud de los ecosistemas acuáticos (Ana María Peláez, 2011; Corpoboyacá, 2017), es por esto que frente a esta problemática, se propone una solución biotecnológica basada en la implementación de un sistema integrado compuesto por un humedal artificial y un reactor bacteriano, diseñado para la remoción eficiente de hierro y otros contaminantes.

En relación con lo anterior se determina que los humedales artificiales han demostrado ser una alternativa sostenible especialmente para el tratamiento de aguas residuales, al combinar procesos físicos, químicos y biológicos que permiten la sedimentación, filtración y degradación microbiana de contaminantes (Elba Barrios, 2025). De igual manera estos presentan un bajo costo operativo, una capacidad de adaptación a condiciones locales y diversos beneficios ecológicos como es la conservación de biodiversidad, lo que tiende a convertirlos en una opción ideal para las zonas rurales con alta presión minera (Nava-Rojas et al., 2023).

Por su parte, los reactores bacterianos, suelen utilizar diversas comunidades microbianas de características reductoras las cuales promueven la precipitación de metales como el hierro mientras incrementan el pH y la alcalinidad del agua tratada (Jacobo, 2024; Vásquez et al., 2020). Así mismo mediante revisiones bibliográficas se ha determinado que esta tecnología ha sido validada en contextos mineros de diversas partes del mundo, donde se han presentado

resultados positivos en la remoción de hierro al igual que en la remoción de zinc y manganeso (Jacobo, 2024).

Determinando así que la integración de ambos sistemas permite abordar la contaminación desde una perspectiva holística, maximizando la eficiencia de remoción, reduciendo costos y promoviendo la restauración ambiental de manera segura y económica, además, su implementación en Samacá, Boyacá contribuiría no solo a la descontaminación de fuentes hídricas, sino también al fortalecimiento de prácticas mineras más responsables y sostenibles, las cuales se encuentran alineadas con los objetivos de desarrollo territorial y a la conservación ambiental.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Diseñar y evaluar un modelo integrado de tratamiento biotecnológico para la remoción de hierro en aguas residuales provenientes de actividades mineras en el municipio de Samacá Boyacá, mediante la implementación de un sistema combinado de humedal artificial y reactor bacteriano.

1.3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar las aguas residuales mineras con presencia de hierro en términos fisicoquímicos y microbiológicos en zonas representativas de Samacá Boyacá.
- Implementar un prototipo de sistema integrado conformado por un humedal artificial y un reactor bacteriano para el tratamiento de aguas contaminadas con hierro.
- Evaluar la eficiencia del sistema diseñado en la remoción de hierro y su viabilidad técnica y ambiental como alternativa sostenible para la minería en Boyacá.

2. MARCO TEÓRICO

Los metales pesados son aquellos que presentan una alta densidad, un peso atómico elevado y una toxicidad significativa algunos ejemplos comunes de metales pesados son el plomo (Pb), mercurio (Hg), cadmio (Cd), arsénico (As) y, en ciertos contextos, hierro (Fe), aunque el hierro generalmente no es tóxico en los niveles normales, cuando este se encuentra en ambientes contaminados tiende a precipitar como óxido insoluble, lo que por consecuencia afecta la vida acuática y de igual manera la calidad del agua (Pabón et al., 2020). A raíz de lo anterior se puede afirmar que en Colombia existe un problema al respecto y es la enorme contaminación por metales pesados en especial hierro, que sufren los ecosistemas en zonas y regiones donde se lleva a cabo diversas actividades de exploración y explotación minera, esto a pesar de que existe una fuerte regulación jurídica la cual está dirigida a coordinar todas las actividades mineras con la finalidad protección al medio ambiente (Luis manuel Benedetti Rojas, 2004).

En respuesta a las diversas problemáticas surge la implementación de la biotecnología como es el caso de los humedales artificiales, comprendiendo que en estos es esencial el uso de plantas que permiten una limpieza al medio ambiente, a esto se le denomina fitorremediación reconociendo que este proceso se ha considerado una alternativa para la recuperación de aguas contaminadas, ya que en estas las plantas actúan como filtros los cuales eliminan los contaminantes, por otra parte sus raíces absorben la materia orgánica y absorben los metales pesados, tratando de esta manera una gran variedad de contaminantes, es por esto que diversos estudios se demuestran la aplicación de humedales artificiales en la industria como un método que evita la contaminación en las fuentes acuíferas, especialmente en las zonas donde el recurso hídrico es de vital importancia o se encuentra de manera muy limitada (André & Cardona, 2018).

De igual manera en estudios realizados por Riggio et al., (2018) se evaluó el rendimiento del tratamiento de los humedales que presentaban y no presentaban vegetación, y donde se llegó a la conclusión de que el rendimiento de los humedales aumenta significativamente cuando está la presencia de plantas, esto debido al uso de la fitorremediación, ya que mejora el

tratamiento de las aguas residuales mineras, siendo este un nuevo concepto de tecnología que se puede implementar a varios tipos de flujos de aguas residuales. Además, se determinó que para realizar una selección de las especies vegetales utilizadas en los humedales artificiales requiere una cuidadosa consideración, esto debido a los factores como el clima, temperatura del agua, a los efectos tóxicos potenciales de las aguas residuales y su variabilidad, dado que la vegetación debe ser capaz de sobrevivir. El carrizo común, *Phragmites australis* (*P. australis*), es una de las plantas que se utiliza en todo el mundo especialmente en humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales (Mulkeen et al., 2017). por otra parte se afirma que la *P. australis* es la macrófita más estudiada cuya función en los humedales artificiales es crear condiciones óptimas que permitan la eliminación de contaminantes mediante la adsorción (Vymazal & Březinová, 2016).

Así mismo la adsorción es un proceso en el cual los iones de tipo metálico se adhieren a un material sólido en el caso de un humedal artificial que tenga plantas, este adhiere a las raíces o a las hojas de las plantas, este proceso puede presentar características físicas o químicas esto dependiendo la interacción del metal con los grupos funcionales del adsorbente, en este proceso también existen factores de carácter dependiente como es el caso de la temperatura del agua, el pH, el tiempo de contacto y la concentración del metal (Bedoya-Betancur et al., 2023; Sun-Kou et al., 2014). Según un estudio realizado por Bedoya Betancur et al., 2023) en Medellín se evaluó la remoción de los metales pesados en aguas residuales industriales usando biomasa, donde lograron eficiencias de remoción de hasta el 99.82% para Cr, 95.17% para Fe y 81.90% para Cu, recalando así lo esencial que es el proceso de absorción para el tratamiento de aguas contaminadas con hierro y demás metales.

Adicionalmente como herramienta biotecnológica está la implementación de microorganismos en diversas estructuras como son los biorreactores, para el caso de las aguas contaminadas con hierro los microorganismos comúnmente utilizados son los ferrooxidantes como es el caso de la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans*, la cual cataliza la oxidación de diversos minerales sulfurados, como la pirita o hierros, pero del mismo modo existen bacterias que aceleran el proceso, así mismo se puede recurrir a bacterias para

anularlo por completo o ralentizar el proceso, siendo así la base de diversas técnicas preventivas y de remediación de las aguas contaminadas (Pozo-Antonio et al., 2017).

En resultados obtenidos por Goswami et al., (2022), se demostró que los microorganismos *Thiobacillus ferrooxidans* contienen un alto potencial que les permite tolerar altas concentraciones de metales pesados y sobre todo hierro, incluso estas cuentan con la capacidad de reducir su concentración en diversos ambientes contaminados como es el caso de las aguas residuales y los sedimentos. De igual manera se identificaron diferentes mecanismos que son asociados a la resistencia y tolerancia de los microorganismos, como es la acumulación, la adsorción, bioadsorción, la precipitación y biotransformación biológica de los metales, estas se consideraron como estrategias claves ya que los microorganismos lograron transformar metales pesados y por ende mitigar sus efectos tóxicos.

De igual forma cuando se habla de bioadsorción se reconoce como un proceso de tipo fisicoquímico, en el cual determinados materiales biológicos, como son las bacterias, hongos o residuos vegetales logran captar y así mismo retener diversos contaminantes, pero en especial metales pesados en soluciones acuosas. Esto a diferencia de la bioacumulación, ya que en esta implica una actividad metabólica, mientras que en la bioadsorción puede ocurrir tanto en la biomasa muerta como en la viva, por lo tanto, no requiere energía celular para funcionar (Olivia Cañizares-villanueva, 2000a; Tejada et al., 2015).

Es por esto que un sistema integrado de humedal artificial junto a biorreactor bacteriano con microorganismos especializados en la solubilización de hierro, puede ser una herramienta biotecnológica muy positiva ya que el humedal se encarga de la sedimentación, fitorremediación y adsorción, mientras que el biorreactor se encarga de la degradación y solubilización del hierro lo que se puede determinar como un pulidor final, por otra parte este tipo de equipos abre oportunidades para estudios sobre cinética de remoción, selección vegetal, y optimización de procesos microbianos.

2.1. ESTADO DEL ARTE

La industria minera tiende a representar una de las principales fuentes de contaminación ambiental por metales pesados, los cuales no pueden ser degradados ni biológicamente ni químicamente (Ali et al., 2019). Es por ello que una vez liberados en los ecosistemas, estos metales pueden ser absorbidos por organismos y transferirse a lo largo de las cadenas tróficas, aumentando su concentración en cada nivel, en un proceso conocido como biomagnificación, incrementando así significativamente la toxicidad de los metales pesados, por ende afectando tanto a la biodiversidad como a la salud humana (Bazan & Galizia, 2018).

Se puede afirmar que dentro de los principales factores que afectan los ecosistemas por contaminación por metales pesados, se encuentran diversas actividades humanas donde destacan en su mayoría operaciones de tipo minero y demás actividades de tipo industrial y urbana (Vílchez Vargas, 2005), donde se afirma que la tasa de contaminación del agua puede rondar cerca de los 200 millones de metros cúbicos al día (Nava-Rojas et al., 2023). Así mismo se determina que este hecho conlleva un gran número de problemas en la vida de las plantas esto debido a que los metales acaban depositados en los suelos transportados a los mismos por los ríos, como consecuencia se da la disminución del crecimiento o el amarillamiento de las hojas proceso que se conoce como clorosis (Azpilicueta et al., 2010), de igual manera en la vida humana donde los efectos se pueden ver representadas como erupciones cutáneas, malestar de estómago y diversas úlceras, problemas respiratorios, debilitamiento del sistema inmune, daño en los riñones e hígado, cáncer de pulmón, afecciones cardíacas, óseas, testiculares y del sistema nervioso central y periférico o incluso llegar a la muerte (Nava-Rojas et al., 2023).

Por ende en respuesta a este problema, la biotecnología ambiental ha desarrollado diversas estrategias de biorremediación, es especial una técnica que se basa en sistemas biológicos los cuales son capaces de remover diversos contaminantes de manera eficiente y sostenible, es por ello que se han implementado diferentes enfoques de tipo biológicos que se basen en la remediación de ambientes que se encuentran contaminados con metales pesados,

hidrocarburos, compuestos xenobióticos y elementos radioactivos, es por esto que destacan la fitorremediación, algas, biorreactores y biorremediación microbiana, aunque la biorremediación no es una tecnología reciente, su evolución ha permitido mejorar su eficiencia y reducir costos operativos, posicionándose como una alternativa viable para la gestión de la contaminación ambiental, ya que estudios recientes han demostrado que los avances en la ingeniería genética y biotecnología han realizado optimización, la adaptación de los microorganismos y de igual manera el rendimiento de los sistemas biológicos en diversos contextos de contaminación, por ende el desarrollo de estrategias de biorremediación ha consolidado un papel esencial como una herramienta que resulta se clave en la mitigación de la contaminación ambiental, por ende la integración de estos métodos con tecnologías emergentes permitirá mejorar la eficiencia y aplicabilidad de los procesos en entornos afectados por agentes contaminantes (Cota-Ruiz et al., 2018).

Los procesos biotecnológicos que se consideran más eficientes son aplicados en el control de la contaminación ambiental ya que se basan principalmente en mecanismos como es la biosorción y la bioprecipitación, no obstante, otros enfoques emergentes han surtido como es la unión a macromoléculas específicas, éstas están siendo investigados por su potencial prometedor en aplicaciones futuras, el término biosorción se utiliza en este contexto para describir la capacidad de la biomasa tanto viva o muerta ya que está tiene la capacidad de remover contaminantes mediante mecanismos fisicoquímicos, tales como la adsorción y así mismo el intercambio iónico, por otra parte se afirma que cuando se emplea biomasa viva, también se consideran mecanismos de utilización metabólica, los cuales permiten una interacción activa con los contaminantes presentes en el medio ambiente, además, se han desarrollado varios sistemas que integran mezclas de microorganismos y en otros casos, plantas superiores, permitiendo así una sinergia entre los distintos mecanismos de remoción y con ello una mayor eficiencia en ambientes complejos es por ello que estas tecnologías han demostrado ser efectivas en la remediación de aguas residuales, en los suelos contaminados y en las emisiones gaseosas, posicionándose como herramientas clave en la biotecnología ambiental moderna (Olivia Cañizares-villanueva, 2000).

Es por ello que los humedales artificiales representan una alternativa tecnológica sostenible para el tratamiento de diversos tipos de aguas residuales. A diferencia de los sistemas convencionales, estos humedales ofrecen una solución ecológica que minimiza el impacto ambiental, optimizando la remoción de contaminantes mediante procesos naturales. Su diseño sencillo, bajo costo de implementación y mantenimiento, junto con su alta eficiencia en la depuración de aguas, los convierten en una opción especialmente viable para países en vías de desarrollo. Debido a su capacidad de adaptación y eficacia comprobada, estas tecnologías ‘verdes’ han sido progresivamente incorporadas en estrategias de gestión hídrica con enfoques integrales de conservación ambiental (Esperanza Perez & Jimenez Prieto, 2022)

Según Leonardo andres Parrao Lopez, (2018) esta tendencia surge como respuesta al incremento de contaminantes biológicos y químicos en cuerpos de agua superficiales, generando la necesidad de desarrollar métodos de bajo costo y alta eficiencia en la remoción de contaminantes, según esto estudios han demostrado que los humedales artificiales domiciliarios pueden alcanzar tasas de remoción de materia orgánica entre 77% y 94%, una vez estabilizado el sistema, según parámetros como DQO, DBO, fósforo, nitrógeno y sólidos suspendidos totales. En sistemas aún en proceso de estabilización, las tasas de remoción pueden oscilar entre 53% y 29%. Dentro de las especies vegetales estudiadas, *Scripus SSP* ha mostrado alta eficacia en la remoción de contaminantes.

De igual manera en investigaciones realizadas por Sanz, (2018) reconoce que las aguas no tratadas, deterioran el entorno natural y por ende reducen la productividad agropecuaria, esta situación limita la competitividad de pequeños productores, quienes ven restringido su acceso a mercados más exigentes en términos de calidad sanitaria y ambiental. En este sentido, los humedales construidos no solo ofrecen beneficios ecológicos, sino que también se posicionan como herramientas clave para el desarrollo económico sostenible en regiones rurales, es por ello que el doctor pedro cisterna creo un dispositivo útil en humedales artificiales, el cual permite aumentar la eficiencia hidrodinámica del humedal, que comprende al menos tres tuberías localizadas en forma horizontal a diferentes alturas modificando así las características en la estructura del humedal y aumenta su eficiencia en un 90%.

Es por esto que el desarrollo de estrategias biotecnológicas para la remediación ambiental ha cobrado gran relevancia en los últimos años, ya que estas estrategias se destacan por ser más rentables, eficientes y sostenibles en comparación con los métodos físico químicos, en este contexto, las bacterias resistentes a metales pesados han emergido como una herramienta poderosa en los procesos de biorremediación, se puede decir que estas bacterias poseen mecanismos adaptativos que les permiten sobrevivir en ambientes altamente contaminados, y al mismo tiempo, transformar, inmovilizar o acumular metales tóxicos, reduciendo así su biodisponibilidad y toxicidad, por ende su aplicación en cuerpos de agua contaminados representando así una alternativa prometedora para mitigar los efectos de la contaminación metálica, especialmente en zonas impactadas por actividades industriales como la minería (Govin-Sanjudo et al., 2020).

Así mismo el uso de microorganismos, particularmente bacterias con capacidad de incorporar metales dentro de su estructura celular, ha tomado relevancia como estrategia de biorremediación en zonas contaminadas por metales pesados, no obstante, estos organismos enfrentan desafíos como son la variabilidad en temperatura, pH y metabolismo, los cuales afectan su eficiencia en procesos de remoción (ZENG et al., 2022). Dentro de las especies con mayor potencial se encuentra *Acidithiobacillus ferrooxidans*, una bacteria quimiolitotrofa que utiliza CO₂ como fuente de carbono y obtiene energía mediante la oxidación de hierro y azufre, junto a *ferrooxidans*, se ha identificado a *thiooxidans*, capaz de generar ácido sulfúrico a partir de azufre, lo que amplía su uso en biohidrometalurgia (Saavedra Olaya & Corton, 2018).

También existen bacterias del género *Bacillus* las cuales son un grupo bacteriano de relevancia en diferentes áreas como es el caso de la medicina, la agricultura y la industria; y por último en el área biotecnológica éstas se ha utilizado principalmente para la biorremediación, es por esto que diferentes estudios han mostrado el gran potencial de este grupo microbiano para resolver, los problemas de contaminación del ambiente por metales pesados, como el hierro (Hernández-Caricio et al., 2022).

Sin embargo, Sharma et al. (2020), ha investigado sobre el género *Bacillus* donde también ha sido utilizado para generar una optimización en procesos de fitorremediación en diversos sitios que se encuentran altamente contaminados con metales pesados. Así mismo las bacterias pertenecientes a este género tienden a presentar diversos mecanismos los cuales les permiten tolerar la presencia de metales pesados en el ambiente donde se encuentren, entre los que podemos encontrar está la exclusión, la bioacumulación, la bioadsorción entre muchos otros entre otros (Ontañón et al., 2018).

Así mismo existen muchos más géneros de bacterias lixiviantes las cuales pertenecen a los géneros *Acidithiobacillus*, *Acidiphilium*, *Acidiferrobacter*, *Ferroplasma*, *Leptospirillum*, *Alicyclobacillus*, *Sulfobacillus*, *Ferrimicrobium*, *Acidimicrobium* y *Ferrithrix*; en estos géneros se encuentran bacterias de tipo mesófilas y de igual manera moderadamente termófilas, así mismo para las arqueas, los géneros son de tipo *Sulfolobus*, *Acidianus*, *Metallosphaera*, *Sulfurisphaera* y *Ferroplasma*; estos géneros en específico se caracterizan por ser oxidantes de hierro (II) y azufre extremadamente termófilas (Vera et al., 2013).

Por otra parte la biolixiviación es el proceso de solubilización de metales a partir de minerales, promovido por microorganismos capaces de oxidar compuestos metálicos. Su importancia radica en la oxidación microbiológica del hierro y azufre, facilitando la recuperación de metales en solución, es por esto por lo que las primeras investigaciones en biohidrometalurgia se centraron en la identificación y caracterización fisiológica de cultivos puros de *Acidithiobacillus ferrooxidans*, una de las bacterias mesófilas más relevantes en estos procesos. Aunque no es el único microorganismo implicado, se ha demostrado que *A. ferrooxidans* es altamente eficiente en la solubilización de hierro, lo que lo hace clave en proyectos de recuperación de metales (Rivera et al., 2011).

De igual manera este proceso de biolixiviación también permite la extracción de minerales a partir de desechos y depósitos de minerales del suelo, y el proceso de lixiviación es comúnmente observado en lo que se reconoce como pilas biológicas y biolixiviación (Yin et al., 2018). En este caso la actividad microbiana es la causante de la disolución del mineral mediante la generación contaminante debido a la presencia de diversos grupos funcionales y

a los metabolitos presentes en su superficie (Mwandira et al., 2020). Así mismo la biosorción consta de dos fases, la primera es la fase sólida (sorbente), y la segunda fase una líquida (disolvente) la cual contiene el contaminante, en este caso los biosorbentes pueden ser bacterias, hongos o algas, así como desechos vegetales y forestales, lo cual permite la reutilización de material agrícola y forestal, es por esto que el alto contenido de celulosa en el material vegetal se convierte en un instrumento muy eficaz para la biosorción de los iones que presentan los metales pesados (Jain et al., 2016).

También existe un término conocido como biorremediación está se refiere al empleo de organismos vivos para eliminar desechos, sustancias peligrosas u otros contaminantes del ambiente (Bour, 2016). Está misma permite la eliminación de compuestos de desecho ya que tiende a degradar los contaminantes; permitiendo así una desintoxicación de ambientes contaminados (Azubuike et al., 2016). Por otra parte la naturaleza de los contaminantes a tratar por este método muchas veces son los agroquímicos, los compuestos clorados, los colorantes, los gases de efecto invernadero, los metales pesados, los hidrocarburos, los residuos nucleares, los plásticos y finalmente las aguas residuales (Tekere & Tekere, 2019). Este es un proceso económico el cuál presenta la posibilidad de poder ser acoplado con diversas técnicas de tratamiento, estableciendo de esta manera una cadena de tratamiento para desechos mixtos y complejos (Azubuike et al., 2016).

En estudios realizados por Álvarez, (2022) han abordado el aislamiento y la caracterización de microorganismos provenientes de diversos sitios contaminados, identificando así diversas cepas resistentes las cuales son capaces de metabolizar metales tóxicos. Un caso particular es la caracterización de diversas bacterias que son resistentes a Pb^{2+} , Cr^{6+} y Fe^{2+} en áreas contaminadas de la ciudad de Guanajuato, México, esto ha proporcionado información clave para la implementación de diversas estrategias de remediación en algunos ambientes afectados por actividades industriales, es por ello que la combinación de biorremediación y nanotecnología ha demostrado ser una herramienta prometedora para la remoción y para la recuperación de metales tóxicos, debido a que la optimización de estos procesos, junto con el aislamiento de microorganismos resistentes, permite avanzar hacia diversas soluciones

sostenibles y de igual manera eficientes para la gestión de la contaminación metálica en entornos afectados.

Así mismo otros estudios realizados por (Bustos Murillo et al., (2023)) han comprobado que los sistemas donde se utilizan microorganismos han emergido como una alternativa innovadora y sostenible para el tratamiento de aguas residuales, ya que estos sistemas aprovechan la capacidad de ciertas bacterias exoelectrogénicas también conocidas como bacterias exoelectroquímicas para transferir electrones generados durante la biorremediación hacia un electrodo externo, cerrando un circuito eléctrico, este proceso no solo permite la remoción eficiente de la carga contaminante presente en las aguas residuales, sino que también posibilita la generación de energía en forma de corriente eléctrica o la producción de biocombustibles con alto poder calorífico, produciendo así incluso una energía renovable.

2.1.1. Tipos de humedales artificiales

2.1.1.1. Humedal artificial de flujo superficial:

Estos humedales generalmente consisten en canales o cuencas que son poco profundos que contienen un suelo o diversos medios que tienden a favorecer el crecimiento de macrófitos enraizados, donde generalmente se ponen en contacto las aguas residuales con flujo lento en superficies biológicas reactivas (Kadlec & Robert, 1996; Vymaza, 2022), al igual manera los humedales artificiales de flujo superficial tienden a clasificarse según el tipo de macrófito que se utilice entre estos existen: macrófitas con hojas flotantes, macrófitas sumergidas, macrófitas flotantes, macrófitas emergentes y algunos árboles (Kadlec & Wallace, 2008; Vymaza, 2022).

Así mismo en este tipo de humedales se tienden a eliminar los compuestos orgánicos por el metabolismo bacteriano de las bacterias las cuales pueden ser adheridas como de vida libre, cuando se habla de bacterias adheridas estas pueden estar adheridas a los tallos y hojas de las macrófitas enraizadas, a las raíces, a los rizomas en especial de las plantas que son flotantes. Por otra parte, en estos la eliminación de los sólidos suspendidos ocurre por el proceso de

sedimentación mediante gravedad, ya que las plantas logran minimizar la turbulencia inducida por el viento y de igual manera la agitación del agua, lo que genera una sedimentación eficiente (Brix, 1987; Vymaza, 2022). Por otra parte la eliminación de nitrógeno se da principalmente por un proceso de desnitrificación, mientras que la absorción se da por diversas plantas que desempeñan papeles menores, en caso de la nitrificación esta ocurre en la mayoría de este tipo de humedales, pero este proceso no elimina el nitrógeno de las aguas residuales y por el contrario sólo se transfiere amoníaco a nitrato, por ello para lograr la eliminación mediante desnitrificación debe existir una capa de material vegetal que se encuentre descompuesto en el fondo del humedal y la eliminación de fósforo también suele ser muy baja esto debido al limitado contacto de las aguas residuales con las partículas del suelo; es por ello que la precipitación con Fe es limitada (Vymaza, 2022).

2.1.1.2. Humedal artificial de flujo subsuperficial:

Este tipo de humedal se encuentra diseñado para mantener el nivel de agua completamente por debajo de la superficie del lecho filtrante, esto con el fin de evitar problemas como la proliferación de insectos, en estos se suele utilizar dos opciones de material de relleno que es la arena o la grava, cuando los sistemas tienen lecho con grava suelen ser ampliamente utilizados en diversas partes del mundo como es América Latina, África, Asia, Australia y Nueva Zelanda, esto debido a las características del suelo o la facilidad que se tiene para conseguir el material, mientras que los sistemas de lecho con arena tienen su origen en el continente Europeo, pero hoy en día también son utilizados en varias partes del mundo. Así mismo el uso de arena gruesa suele contribuir a una mayor eficiencia en los procesos de tratamiento, ya que está proporciona a la superficie un crecimiento microbiano y soporta la adsorción al igual que los procesos de filtración, por lo que estos efectos dan una mayor eficiencia al tratamiento, necesitando un menor espacio (Hoffmann, 2011).

2.1.1.3. Humedal artificial subsuperficial vertical y horizontal:

Este tipo de humedal se puede diseñar mediante una estructura como es el caso del humedal que es diseñado en este proyecto, ya que este cuenta con un ingreso de agua de manera

ascendente para el primer filtro es decir el agua ingresa de manera vertical por debajo del lecho filtrante, pero para el segundo filtro el agua se mantiene de manera horizontal sobre un tiempo determinado para así obtener una mayor remoción del contaminante que para este caso es hierro.

2.1.2. Tipos de plantas para humedales artificiales con capacidad de remoción de hierro.

2.1.2.1. *Scirpus californicus*:

Comúnmente conocida como la totora la *Scirpus californicus* es una planta macrófita que presenta un ciclo anual de la familia Cyperaceae esta planta fue utilizada por grupos indígenas que habitaron el continente Americano durante más de 500 años, esto principalmente para producir muchos objetos de tipo artesanal, al igual que para construir varios barcos y chozas, así mismo esta planta tiende a caracterizarse por ser herbácea permanentemente acuática, generalmente habita en lugares como pantanos, balsares, en lagunas, en la sierra y sobre todo en la costa peruana, aproximadamente a 4,000 msnm de altitud (Hýsková et al., 2020)

Por otra parte la taxonomía de la *Scirpus californicus*, perteneciente a la clase Monocotyledoneae, es decir que es familia de la Cyperaceae y pertenece al género *Scirpus*. Esta planta es una especie vegetal de rápido desarrollo, debido a que de esta se genera aproximadamente 20 tn/ha/año incluso llegando hasta 57 tn/ha/año, dependiendo directamente de los nutrientes del sustrato que se le aplica, sin embargo según Hidalgo Castro, (2019) esta especie en específico tiende a tener un fase fenológica cada año, lo que quiere decir que los tallos comienzan a secarse al año y así permite el nacimiento de nuevos brotes, esta planta tiende a crecer en los humedales o pantanos, es por ello que en diversos estudios realizados a través de las hojas de Totora se consideró que esta planta es una manera factible para la implementación en humedales artificiales, ya que tiene la capacidad adsorbente para la descontaminación y limpieza de los efluentes provenientes de las industrias (Pacheco Peña, 2021). Esto debido a que en su ámbito de la fitorremediación se le

considera como una especie bioacumuladora de metales pesados como el plomo y metales como el hierro (DONAIRES et al., 2019).

2.1.2.2. Eichhornia Crassipes:

Mejor conocida como jacinto de agua, lirio acuático o buchón de agua la *Eichhornia crassipes* es una de las plantas más poríferas de la tierra, esta se caracteriza por ser de tipo acuático, que presenta básculas flotantes tiende a ser de un crecimiento muy rápido que se desarrolla en el agua (Guevara Granja & Ramírez Cando, 2015) reconocida por ser un hidrófilo perenne de flotación libre con ancho espeso, brillante y con hojas ovadas, El buchón de agua puede levantarse e incluso crecer por encima de la superficie del agua alcanzando así hasta un metro de altura, es una monocoty herbácea perenne, es decir es miembro de la familia Pontederiaceae, lo que hace que se encuentre generalmente como una planta flotante que se caracteriza por tener raíces largas y plumosas que puede tener más de dos metros de longitud (Kodituwakku & Yatawara, 2020) por estas características se afirma que la *Eichhornia crassipes* tiene resultados óptimos para la remoción de DBO, Sin embargo, esta especie tiene mejor remoción de DQO y a la vez absorción de hierro (Ruiz Tarrillo & Vargas Castañeda, 2024).

2.1.2.3. Phragmites australis:

Más conocida como junco la *Phragmites australis* es una de las especies de plantas emergentes que tiene una extensa distribución a nivel mundial, ya que sus características adaptativas demuestran que esta planta posee un carácter competitivo, esto debido a que su alta diversidad intraespecífica, así como a su plasticidad fenotípica, la *Phragmites australis* presenta una amplia gama de tipo ecológico. Además, esta presenta una gran capacidad de aclimatación a condiciones ambientales que son consideradas de tipo adversas, esta se ha utilizado durante muchos años para los procesos de fitorremediación ya que esta tiende a depurar diversos tipos de aguas residuales, de igual manera posee una alta capacidad para acumular diversos nutrientes, metales pesados y microcontaminantes, lo que la hace distintiva frente a otras plantas acuáticas, debido a su tolerancia a los metales como el

hierro, diversos estudios buscan aumentar su eficiencia para eliminar en totalidad los contaminantes presentes en aguas (Milke et al., 2020).

2.1.2.4. Hydrocotyle Umbellata:

La *Hydrocotyle ranunculoides* pertenece a la familia *Araliaceae* y es una planta acuática perenne con hábito rastrero, la cual se encuentra comúnmente distribuida en diversas regiones del continente Americano, de igual manera esta planta tiene una notable presencia en Brasil, entre sus características morfológicas se incluyen hojas simples de disposición alterna, peltadas y con bordes crenados, presenta laminas redondeadas y miden entre 2 y 6 cm, las cuales son sostenidas por pecíolos que pueden alcanzar hasta 20 cm de longitud, así mismo las flores blancas se agrupan en umbelas, y sus frutos son cápsulas aplanadas (Hamdy et al., 2018). Por otra parte, según estudios realizados por (Carolina Soto Carrión & Raquelina Vera Damián, 2023) esta especie ha demostrado una notable eficacia en la eliminación de metales pesados, particularmente cobre, destacando por su capacidad de acumulación en las raíces. Adicionalmente, en diversas investigaciones se señala su potencial para absorber diversos nutrientes presentes en aguas residuales, como potasio, fósforo, calcio, hierro y zinc, provenientes de sistemas de tratamiento (Gómez et al., 2019).

2.1.2.5. Juncus Effusus Juncus:

El junco blando, una especie herbácea perenne la cuál es perteneciente a la familia *Poaceae*, esta se distingue por sus tallos cilíndricos y bastante erguidos de tonalidad verde claro, que pueden ser lisos o presentar leves estrías, sin mostrar hojas evidentes, así mismo su sistema subterráneo está compuesto por diversos rizomas gruesos, cortos y altamente ramificados, lo cual favorece su propagación vegetativa amplia, por otra parte en la base las vainas presentan una coloración que es más de tipo marrón rojiza con textura mate, y poseen una médula interna continua, las flores surgen en temporadas cálidas, como primavera y verano, agrupándose en inflorescencias abiertas con varias ramificaciones (Astrid Carolina Herrera Páez Anderson Ruiz García Facultad & Estudios, 2017).

En cuanto a los estudios realizados por Astrid Carolina Herrera Páez Anderson Ruiz García Facultad & Estudios, (2017), su desempeño en el tratamiento de aguas residuales obtuvo una alta eficiencia en la remoción de compuestos ya que logró extraer concentraciones relevantes de hierro en un 64,74%.

2.1.2.6. Carex Lasiocarpa:

En muchos de los humedales de agua dulce con vegetación herbácea, que se encuentran ubicados en regiones subárticas y templadas del hemisferio norte, tienden a estar dominados por especies del género *Carex*, ya que estas plantas, mayoritariamente perennes, se propagan mediante rizomas, formando así diversas agrupaciones extensas a través de clonación vegetativa (Bedford et al., 1988). Así mismo una investigación realizada por Zou et al., (2012) en un humedal de la llanura de Sanjiang, al noreste de China donde la temperatura media anual es de aproximadamente 1.9 °C y la precipitación alcanza entre 550 y 600 mm, este estudio consistió en someter columnas de suelo a ensayos controlados durante varios meses, así mismo el procedimiento incluyó una limpieza inicial con agua desionizada, seguida por la aplicación de hierro en dos formulaciones distintas: una solución neutra de FeSO₄ a 100 mg/L y otra ácida a 200 mg/L (pH 3,56), finalmente, se realizó un lavado adicional con el fin de emular el proceso natural de precipitación durante la retención de hierro, entre los resultados indicaron que el 69,4 % del hierro introducido fue retenido en el suelo, mientras que el 24,8 % fue absorbido por la vegetación, concentrándose principalmente en raíces y brotes, mientras que solo el 5,7 % se perdió por escorrentía, determinado así que la planta no solo toleró las altas dosis de hierro, sino que también se evidenció un incremento en la biomasa bajo condiciones de exposición ácida, sin presentar señales de alta toxicidad.

2.1.2.7. Iris Pseudacorus:

La especie *Iris pseudacorus*, conocida coloquialmente como lirio amarillo, es una planta de crecimiento perenne y de estructura vertical que se clasifica dentro del grupo de macrófitas emergentes, así mismo gracias a sus propiedades morfológicas y su capacidad de adaptación,

esta planta ha sido comúnmente empleada como componente ornamental en diversos sistemas de humedales artificiales diseñados para el tratamiento de lixiviados (Chinery, 1988). Por otra parte, en cuanto a sus características físicas, esta planta alcanza alturas que oscilan entre los 40 y 150 cm, su sistema radicular se origina en rizomas con diámetros que van de 1 a 4 cm, de los cuales brotan raíces que generalmente miden entre 10 y 20 cm, aunque pueden extenderse hasta los 30 cm, sus hojas se presentan alargadas y angostas, con anchos de 1,5 a 2,5 cm y las flores se agrupan en espigas que contienen entre 5 y 10 unidades de tono amarillo, cada una con diámetros de 8 a 10 cm (Totoy Quinga, 2022).

En un experimento realizado por Sarango & Andrade, (2023), con lixiviados previamente tratados provenientes de un relleno sanitario en Ecuador, se evidenciaron reducciones significativas en varios parámetros: una disminución del 39,58% en la conductividad eléctrica, una remoción del 78,25% del fósforo total, del 84,85% de amonio y del 41,38% de nitrato, sin embargo en otro caso, relativo a aguas residuales tratadas en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Ucubamba, se alcanzaron eficiencias de remoción de 60% para amonio, 80% para calcio y 53% para hierro, lo que indica su capacidad para la absorción de metales como el hierro (Sarango & Andrade, 2023).

2.1.2.8. Schoenoplectus Californicus

La *Schoenoplectus californicus*, también conocida comúnmente como totora, es una planta acuática perenne emergente la cual se encuentra extensamente en diversos cuerpos de agua del continente americano, abarcando desde regiones norteamericanas hasta zonas del conocido Altiplano en Sudamérica (Blanco, 2018). Morfológicamente, cuenta con rizomas gruesos y tallos verticales que pueden alcanzar hasta cuatro metros de altura, lo que contribuye significativamente a su elevada productividad de biomasa (Blanco, 2018) Así mismo en una investigación llevada a cabo por Puerta et al., (2016), se evaluó el desempeño de esta especie dentro de un humedal artificial en condiciones de laboratorio, orientado al tratamiento de aguas residuales domésticas, en donde en los hallazgos indicaron que logró eliminar el 93,03% del nitrógeno en forma de amonio y el 75,17% del hierro total, siendo esta una de las más eficaces para la remoción de metales (Puerta et al., 2016).

2.1.3. Tipos de bacterias con capacidad de remoción de hierro.

2.1.3.1. Acidithiobacillus ferrooxidans:

Esta bacteria tiende a presentar un alto potencial para la disolución de diversos sulfuros de hierro es una bacteria thiobacillus ferrooxidans, es decir pertenece a la familia de thiobacilli es decir obtiene su energía del proceso de oxidación de compuestos de azufre reducido, esto debido a que los productos químicos inorgánicos reducidos tienden a utilizarse como donantes de electrones para reducir el hierro de igual manera estudios han demostrado que estas bacterias pueden utilizar tanto azufre como hierro como su fuente de energía, lo que las convierte en especies de tipo mixotróficas, estas son bacterias aeróbicas pero tienen un proceso de crecimiento anaeróbico facultativo, pero en el caso de condiciones anaerobias tienden a utilizar el hierro férrico como aceptor de electrones en lugar de oxígeno esto para crecer en azufre elemental o en los minerales (Zhao et al., 2021).

2.1.3.2. Thiobacillus denitrificans:

Esta bacteria presenta potencial para la disolución de sulfuros de hierro crece a un pH neutro (Bosch et al., 2012), en un rango entre 6.8 y 7.4 y en un rango de temperatura entre 28 y 35 °C, con una temperatura óptima de 30 °C (Zhao et al., 2021).

2.1.3.3. Otras bacterias:

Las bacterias oxidantes de hierro comunes, como *Gallionella* , *Sphaerotilus* , *Crenothrix* y *Leptothrix* , tienden a oxidar los iones ferrosos al estado férrico esto para obtener su energía, así mismo estas suelen depositar óxido férrico en las superficies de las tuberías de acero al carbono, por otra parte estas promueven la formación de diversos tubérculos, pero también existen bacterias oxidantes de hierro que suelen ser más comunes estas se encuentran en vainas largas y pertenecen a la clase Chlamydobacteriales, presentan largos filamentos

que se observan fácilmente al microscopio y de igual manera un patrón característico, mientras que las bacterias filamentosas del hierro son omnipresentes en las tuberías de sistemas de distribución de acero al carbono y hierro, por lo general estas bacterias se reportan comúnmente en depósitos asociados con la tuberculación (Shukla et al., 2021).

De igual manera la oxidación de iones ferrosos se considera a menudo una de las características de un grupo de bacterias *Sphaerotilus - Leptothrix*, ya que se ha descrito que *Leptothrix* tiende a crecer de forma autótrofa aprovechando así la energía liberada por la oxidación de iones ferrosos y la *Leptothrix* es una bacteria gramnegativa y la bacteria comúnmente almacena hierro, está presente en aguas de flujo lento pero con contenido de hierro ferroso, está también es interesante por razones ecológicas y biogeoquímicas, ya que como las algas esta se desarrolla en hábitats naturales es decir en colonias de grandes masas, entre las características de formación de vainas de estos organismos se indica la relación con las cianobacterias, lo que quiere decir que en condiciones de tipo favorables se suelen formar en una vaina gelatinosa o de tipo fibrosa, ya que inicialmente, secretan vainas que son mucho más delgadas pero que posteriormente se vuelven más pesadas esto debido a la excreción de más materia orgánica o a la deposición del óxido de hierro, haciendo así que esta sea más pesada y muy resistente a la descomposición, es por esto que se afirma que la presencia de la vaina tiene consecuencias en la parte nutricional y ecológica del organismo (Shukla et al., 2021).

2.1.4. Tipos de biorreactor.

Los tipos de biorreactores se definen en el tiempo de retención ya que estos pueden ser continuos o discontinuos, sin embargo ambos presentan las mismas características es decir que es un recipiente en el cual se lleva a cabo un proceso de tipo químico que involucra organismos o algunas sustancias bioquímicamente activas que son un derivado de dichos organismos, así mismo este proceso puede ser de tipo aeróbico o anaeróbico y los diseños de los mismos pueden variar según el cultivo y el matraz de agitación de laboratorio, estos también tienen numerosas aplicaciones, como el cultivo celular de células o tratamiento de aguas, de igual manera estos suelen ser cilíndricos, con tamaños de litros o metros cúbicos,

y generalmente están fabricados en acero inoxidable, algunos incorporan energía solar , por lo tanto el reactor debe ser abierto como un estanque, también debe ser transparente y estar hecho en vidrio o plástico (Wang & Zhong, 2007).

2.1.4.1. Biorreactor continuo:

Este se alimenta constantemente con sustrato y se extrae producto al mismo ritmo, este es ideal para mantener las condiciones estables en el cultivo, estos presentan una alta productividad ya que presenta menor tiempo de inactividad entre ciclos y se puede tener mayor control de los parámetros como la temperatura y pH, sin embargo, para evitar contaminación necesita muestreos constantes lo que hace que tenga una mayor complejidad en la parte operativa (Cristina & Astudillo, 2010).

2.1.4.2. Biorreactor Discontinuo:

En este se carga completamente al inicio y de igual manera no se añade ni retira nada hasta que el proceso termina, lo que lo hace ideal para procesos de baja escala con un diseño más simple y a la vez más económico, sin embargo, también puede tener una menor productividad y los parámetros pueden ser menos precisos (UnADM, 2025).

2.1.5. Tipos de tratamientos para la remoción de hierro en vertimientos mineros.

2.1.5.1. Tratamiento de oxidación química, precipitación y filtración:

Es importante recalcar que el tratamiento de metales como hierro y manganeso mediante procesos fisicoquímicos usualmente implican de una dosificación controlada de un agente reactivo, el cual es seleccionado según las condiciones específicas del sistema que se desee tratar. Reconociendo así que este compuesto provoca una reacción de oxidación que tiende a transformar las especies metálicas solubles en formas insolubles, lo que posteriormente

favorece la precipitación, ya que la mezcla resultante es conducida hacia una unidad donde se realiza el proceso de filtración y donde su eficiencia de remoción puede alcanzar hasta el 99% de remoción en hierro y cerca del 98% en manganeso, esto dependiendo en función del diseño y de los parámetros operativos del sistema (Bora et al., 2018; Khatri et al., 2017).

Comprendiendo lo anteriormente mencionado los compuestos que comúnmente son utilizados como oxidantes incluyen el hipoclorito, el permanganato de potasio, el peróxido de hidrógeno, el ozono, el cloro y el dióxido de cloro, reconociendo que la selección y dosificación de estos reactivos se debe hacer con base en las características químicas del agua residual, garantizando su efectividad (Vigneswaran & Visvanathan, 1995) Sin embargo según Duque (2009), para lograr una oxidación completa, es clave comprender que este proceso requiere de un tiempo de contacto adecuado, el cual normalmente está entre cinco y treinta minutos, por lo que implica incorporar tanques con características específicas que permitan realizar de forma secuencial el ajuste de pH, la adecuada introducción del reactivo y por último la separación del material precipitado (Johandra et al., 2021).

2.1.5.2. Tratamiento de intercambio iónico mediante ablandamiento por zeolita:

El tratamiento de intercambio iónico es una técnica la cual permite remover iones presentes en las soluciones acuosas, ya sean de carga positiva es decir cationes o negativa es decir aniones, de igual manera este método resulta particularmente eficiente en procesos los de separación y limpieza de aguas contaminadas con elementos como el hierro (Shkolnikov et al., 2012). Por otra parte los materiales naturales como es el caso de la zeolita poseen propiedades que le permiten capturar cationes mediante un proceso de intercambio iónico, ya que la capacidad se expresa en términos de la cantidad total de equivalentes catiónicos que el mineral puede retener, y está estrechamente vinculada a la presencia de aluminio en su estructura cristalina, lo cual influye de manera directa en su eficacia en el momento de intercambio Así mismo el proceso puede alcanzar niveles elevados de eliminación de hierro, con eficiencias cercanas al 98% (Johandra et al., 2021; Zevi et al., 2018).

2.1.5.3. Tratamiento basado en materiales de carbonato de calcio:

Los compuestos con base de carbonato de calcio han demostrado ser altamente eficientes en el tratamiento de aguas contaminadas con metales de valencia +2 y +3, alcanzando tasas de eliminación cercanas al 95 % para el hierro (Aziz et al., 2001; Li et al., 2016). De igual manera este enfoque se distingue principalmente por una combinación entre bajo costo con alto rendimiento, siendo la piedra caliza uno de los materiales más utilizados en la remediación metálica (Komnitsas et al., 2004). Por otra parte la aplicación de estos materiales denominados CCBM (Calcium Carbonate-Based Materials) ha sido ampliamente validada en procesos de descontaminación de agua, especialmente en la remoción de Fe. No obstante, su eficacia está fuertemente influenciada por los niveles de pH, ya que la oxidación del Fe (II) depende de su forma química y a su vez de la velocidad de reacción con el oxígeno. Además, la presencia de materia orgánica natural, así como de cationes coexistentes, logra reducir el área activa de contacto y así interferir negativamente con el proceso de eliminación (Johandra et al., 2021; Mettler et al., 2009).

2.2. MARCO LEGAL

En este apartado se citan las normas, resoluciones y decretos que respaldan la realización del proyecto tal y como se puede apreciar en la Tabla 1.

Tabla 1. Marco legal de la investigación.

Norma	Observaciones
Ley 99 de 1993	Esta norma establece los principios de la política ambiental colombiana, esta también crea el Ministerio del medio ambiente, así mismo en esta también reconoce el derecho a un ambiente sano y promueve el desarrollo sostenible.

Ley 1333 de 2009	Esta ley regula el procedimiento sancionatorio ambiental, así mismo establece las medidas preventivas y compensatorias.
Decreto 501 de 1995	Este reglamenta la inscripción en el registro minero de los títulos para explotación y exploración de minerales de propiedad nacional.
Ley 685 de 2001	Esta ley regula la explotación y la exploración minera en el país de Colombia, de igual manera exige la implementación de medidas que buscan prevenir, mitigar y compensar los impactos ambientales, lo que incluye el tratamiento de las aguas residuales.
Decreto 3930 de 2010	Este decreto establece las disposiciones sobre el ordenamiento del recurso hídrico y los vertimientos al recurso hídrico.
Decreto 1076 de 2015	Este decreto compila normas ambientales entre ellos los requisitos para vertimientos, licencias y planes ambientales para un manejo ambiental.
Resolución 1433 de 2004	Esta resolución establece los planes de vertimiento y manejo de vertimientos.
Resolución 0631 de 2015	Esta resolución establece los parámetros y valores máximos permisibles para los vertimientos puntuales en cuerpos de agua, reconociendo que en el Capítulo VI, Artículo 10 de la Resolución 631, se encuentra definidos para el sector minero los valores límite permisibles.

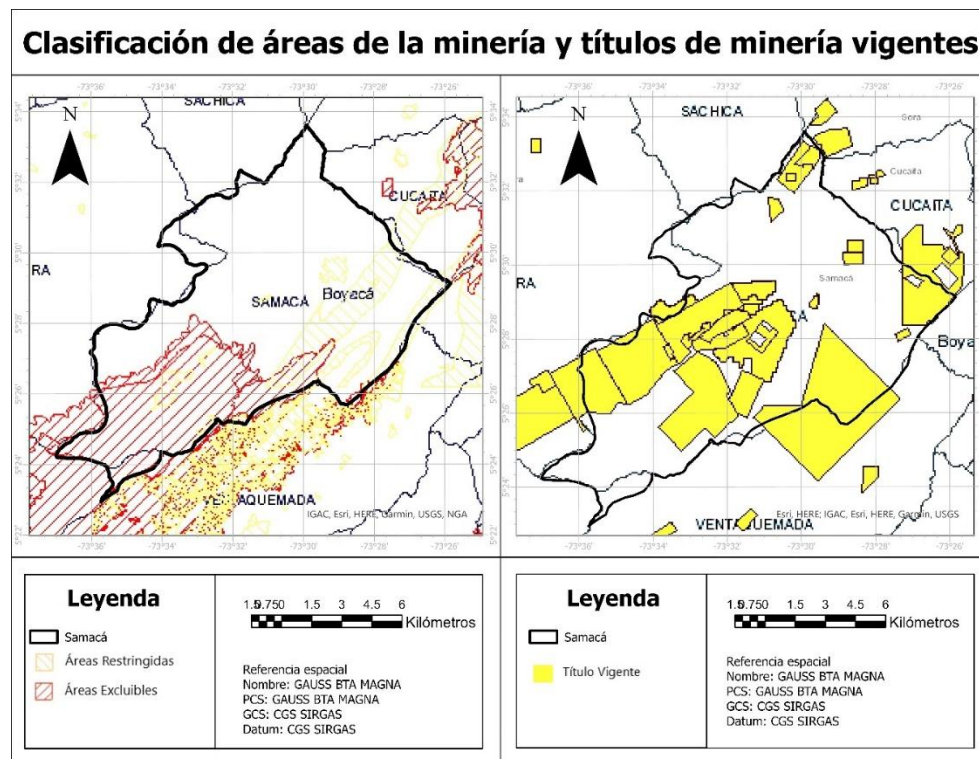
Fuente: Autor

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS MINERAS DE SAMACÁ BOYACÁ

Esta caracterización se realizó mediante la utilización de sistemas de información geográfica, para este caso se utilizó el programa ArcGIS y los datos de la agencia nacional de minería en el año 2025 tal como se puede observar en la Figura 2.

Figura 2. Clasificación de áreas de la minería y títulos de minería en Samacá, Boyacá.



Fuente: Autor (2025).

Para el municipio de Samacá, Boyacá se realizó una identificación de las zonas mineras, donde se analizaron dos factores que son las áreas restringidas en el color rayado amarillo, en estas zonas la minera es limitada por diversos factores de tipo social, legal o ambiental, generalmente las zonas restringidas requieren de una protección especial, por otra parte las zonas excluibles que son de color rayado rojo, es donde se encuentra completamente

prohibido la explotación o exploración minera, sin embargo cuando se realiza una superposición entre los dos mapas presentados es decir entre las áreas protegidas y restringidas con los títulos mineros vigentes, se puede identificar con base en los GEO portales de la agencia nacional de minería que algunas zonas mineras activas se encuentran dentro de las áreas restringidas, lo que puede estar presentando un impacto sobre la fuentes, hídricas, la biodiversidad o en las comunidades locales.

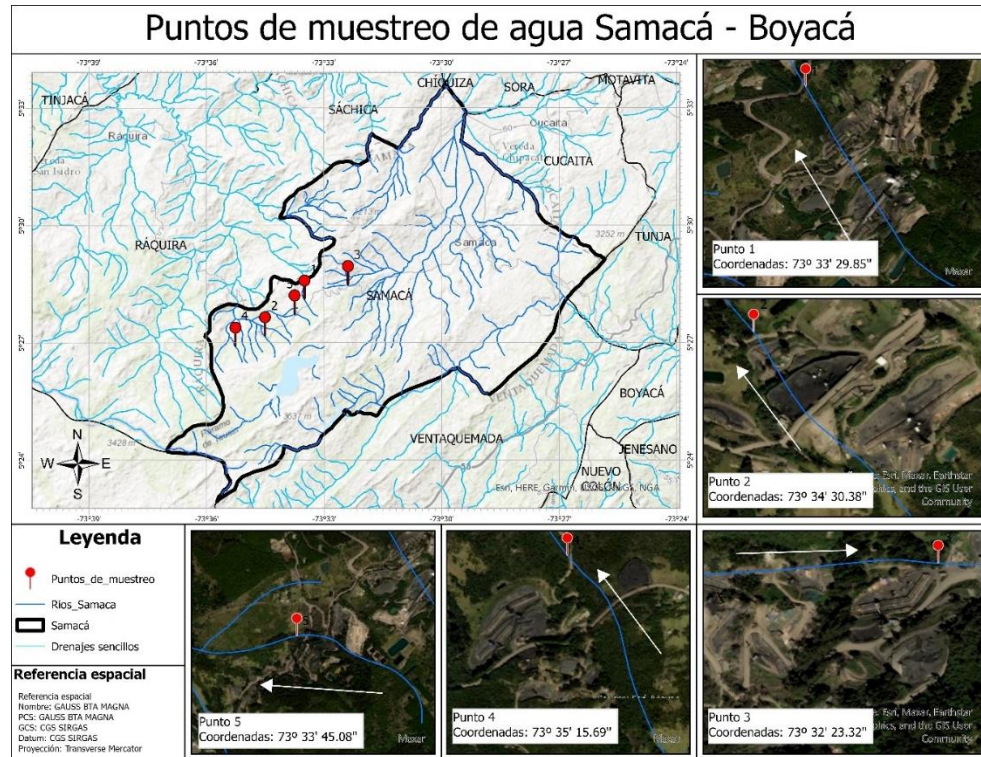
Por otra parte, también se evidencio que existen títulos mineros vigentes en varias zonas de tipo excluible, en este caso se confirma una vulneración en las normativas y posibles daños a ecosistemas que deberían ser protegidos. Sin embargo, estas afectaciones al medio ambiente también se ve principalmente en los hornos de coquización del municipio de Samacá Boyacá ya que estos utilizan agua superficial (Carolina Rosas, 2011),pero cuando se llevó a cabo una revisión de los archivos presentes en Corpoboyacá, Corpochivor y la CAR, se identificó que en las doscientos cuatro actividades que se encuentran catalogadas y a la vez inscritas en la base de datos del Páramo de Rabanal, no existe ningún tipo de petición o trámites de concesión de aguas superficiales para que esta tenga un uso legal en la actividad minera (Flores, 2008), esto es importante ya que estas aguas logran generar una contaminación ambiental en los vertimientos si no son controlados, lo que evidencia la necesidad de un control administrativo mucho más estricto por parte de las autoridades ambientales.

3.2. MUESTREOS

Para la ejecución de los muestreos, se definieron puntos estratégicos georreferenciados, cuyas coordenadas están representadas en la Figura 3, la ubicación espacial de cada sitio fue determinada mediante herramientas de sistemas de información geográfica (SIG), lo que permitió una visualización precisa sobre el mapa base, así mismo en este proceso se emplearon los programas como ArcGIS y Google Earth, los cuales facilitaron la integración de datos espaciales, la validación de coordenadas en campo y la generación de cartografía temática. Esta metodología no solo optimizó la planificación de los muestreos, sino que

también garantizó la trazabilidad geográfica de los datos obtenidos, fortaleciendo la representatividad espacial del estudio.

Figura 3. Puntos de muestreos de agua en el municipio de Samacá, Boyacá.



Fuente: Autor.

Como se observa en la Figura 3 para este estudio se seleccionaron cinco puntos de muestreo dentro del municipio de Samacá, Boyacá, específicamente en zonas con una influencia directa de minas activas de explotación de carbón, por otra parte la ubicación de cada punto se determinó estratégicamente aguas abajo de los frentes mineros, esto con el fin de capturar evidencia de vertimientos asociados a la actividad extractiva, así mismo la recolección de muestras se realizó bajo criterios de observación ambiental, priorizando sitios donde se manifestaran indicadores de tipo visual y de tipo sensoriales de contaminación, tales como:

- 1) Coloración anaranjada del agua, la cual es atribuida a la presencia de óxidos de hierro.
- 2) El olor metálico el cual a su vez es característico y asociado a procesos de oxidación.

- 3) La elevada turbidez, la cual se considera una señal de carga de sólidos suspendidos y precipitados metálicos.

De igual manera cada muestra fue debidamente rotulada con las coordenadas, preservada en botellas y por último transportada bajo condiciones controladas hasta el laboratorio, donde se llevaron a cabo los análisis fisicoquímicos correspondientes, recalcando así que esta metodología logro garantizar la trazabilidad adecuada y el aumento en la calidad de los datos, lo que es fundamental ya que permite evaluar de la manera más optima la contaminación presente en los vertimientos.

3.3. ANÁLISIS PARA LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DE CALIDAD DEL AGUA EN 5 PUNTOS MINEROS DE SAMACÁ, BOYACÁ.

3.3.1. Medición en el multiparámetro.

Para las mediciones se tomaron aproximadamente 60 ml de cada una de las muestras y se inició la medición en el equipo como se observa en la Figura 4, el cuál es de la marca HANNA instruments modelo HI 98194, con las características del equipo en este proceso se determinó, pH, Conductividad, Temperatura, Porcentaje de Oxígeno Disuelto en el Agua, Sólidos Disueltos Totales y Solidos suspendidos totales.

Figura 4. Medición de la muestra de agua minera en el multiparámetro.



Fuente: Autor.

3.3.2. Demanda química de oxígeno.

El primer paso que se realizó fue la preparación de la muestra donde se tomó una muestra de agua representativamente y se agregó en un recipiente completamente limpio, donde se dividió la muestra en dos partes y una adicional para el blanco.

Después de esto se realizó la adición de reactivos donde se añadió el 0.25 ml de reactivo de dicromato de potasio a cada una de las muestras como se observa en la Figura 5, luego se añadió 1.25 ml de ácido sulfúrico concentrado a las muestras para acidificar la solución, en el siguiente paso se agregó 0.05 ml de sulfato de plata para que este actúe como catalizador para la oxidación de compuestos orgánicos. Para el blanco, utiliza agua destilada en lugar de la muestra de agua.

Por consiguiente, se colocó las muestras en un digestor a una temperatura de 150°C durante dos horas asegurándose así de que las muestras estén completamente selladas para evitar la pérdida de volátiles.

Después del proceso de digestión se deja enfriar las muestras a una temperatura ambiente y añadir 0.5 ml de sulfato ferroso amónico a cada muestra y titular las muestras con una solución de ferrocianuro de potasio hasta alcanzar el punto final, el cual se identifica por un cambio de color.

Luego se realizó el Cálculo de DQO:

Para realizar el cálculo de DQO se completó la siguiente fórmula:

$$DQO = \frac{(A - B) * M * 8000}{ml \text{ de la muestra}} \quad (3-1)$$

Donde:

“A” es la cantidad resultante de la titulación del Blanco

“B” es la cantidad resultante de la titulación de la Muestra “M” es la molaridad del FAS.

Luego se realizó DQO para la primera muestra

$$\text{Molaridad FAS: } \frac{\text{moles de soluto}}{\text{Litros de solucion}} * 0.1 \quad (3-2)$$

$$DQO = 32.64 \text{ MgO}_2/\text{L}$$

De igual manera se realizó DQO para la segunda muestra

$$DQO = 48.96 \text{ MgO}_2/\text{L}$$

para la tercera muestra

$$DQO = 55.48 \text{ MgO}_2/\text{L}$$

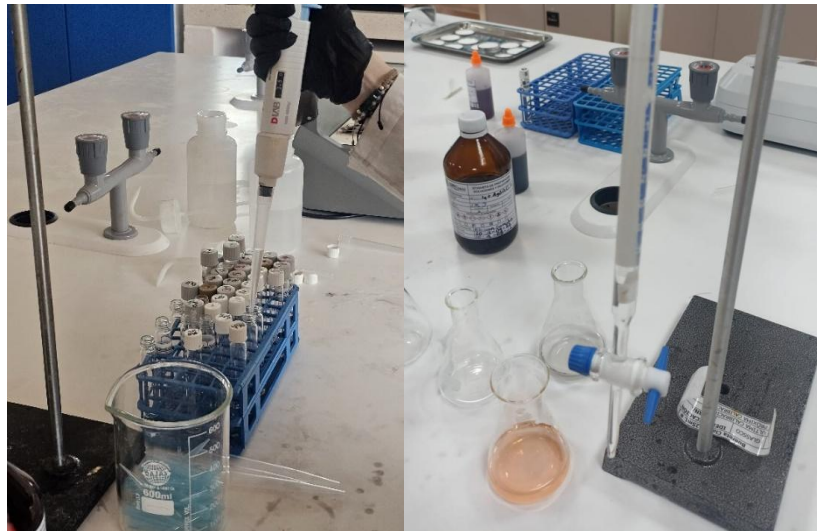
Para la cuarta muestra

$$DQO = 54.91 \text{ MgO}_2/\text{L}$$

Po último para la quinta muestra

$$DQO = 47.45 \text{ MgO}_2/\text{L}$$

Figura 5. Medición de la demanda química de oxígeno de la muestra de agua.



Fuente: Autor.

3.3.3. Demanda Biológica de Oxígeno

Lo primero que se realizó fue tomar una muestra de agua en un recipiente limpio y llenar los frascos de DBO con la muestra de agua, asegurándose de que no queden burbujas de aire.

Después de esto se hizo la adición de reactivos, por lo tanto, para una muestra de 5 ml se añadió 0.5 ml de reactivo de nitrato de manganeso y añadir 0.25 ml de reactivo de álcali-yoduro-azida, después para una muestra de 10 ml se añadió 1 ml de reactivo de nitrato de manganeso y se añadió 0.5 ml de reactivo de álcali-yoduro-azida, para una muestra de 15 ml,

luego añadió 1.5 ml de reactivo de nitrato de manganeso y añadir 0.75 ml de reactivo de álcali-yoduro-azida.

Luego se realizó el proceso de incubación donde se colocaron los frascos en una cámara de incubación a 20°C durante 5 días asegurándose de que los frascos estén cubiertos con papel de aluminio.

Después de la incubación, se retiraron los frascos de la cámara y se midió el oxígeno disuelto inicial utilizando un medidor de oxígeno disuelto (DO) como se observa en la Figura 6, pasando 5 días se midió nuevamente el oxígeno disuelto en los frascos utilizando el medidor de oxígeno disuelto, registrando así las lecturas de oxígeno disuelto inicial y final.

Por último, se realizó el cálculo de DBO donde se calculó restando DBO de oxígeno disuelto final con la lectura inicial y se expresó el resultado en mg/L de oxígeno consumido.

Donde se realizó DBO para la primera muestra

$$DBO5 = \frac{muestra\ 1 + muestra\ 2 + muestra\ 3}{3} \quad (3-3)$$

$$DBO5 = 7.66\ mg/L$$

Se realizó DBO para la segunda muestra

$$DBO5 = 6.86\ Mg/L$$

Se realizó DBO para la tercera muestra

$$DBO5 = 7.86\ Mg/L$$

Se realizó DBO para la cuarta muestra

$$DBO5 = 7.65 \text{ Mg/L}$$

Por último, se realizó DBO para la quinta muestra

$$DBO5 = 6.76 \text{ Mg/L}$$

Figura 6. Medición de la demanda biológica de oxígeno de la muestra de agua.



Fuente: Autor.

3.3.4. Medición Sólidos Sedimentables

Para la determinación de sólidos sedimentables con cono Imhoff se enjuaga primero el interior del cono con agua de muestreo y se seca superficialmente.

Después, se vertió una fracción líquida homogeneizada sin generar ningún tipo de burbujas, dirigiendo el chorro lentamente por la pared interior hasta alcanzar la marca de 1 L, evitando así salpicaduras.

Una vez lleno, se coloca la tapa para minimizar corrientes internas y se deja decantar durante 60 minutos en posición perfectamente vertical y en un entorno libre de vibraciones.

Opcionalmente, a los 30 minutos se realizó una lectura intermedia para evaluar de esta manera la cinética de sedimentación, pero la medición oficial se tomó al cabo de los 60 minutos tal como se detalla en la Figura 7, anotando el volumen de sólidos sedimentados directamente en la escala graduada en mililitros, lo que proporciona el valor de sólidos sedimentables por litro de vertimiento.

Es importante recalcar que este procedimiento se llevó a cabo únicamente en la muestra que se utilizó en el sistema integrado de humedal artificial y biorreactor donde el dato obtenido fue:

Muestra 1: 2.5 ml/ L

Figura 7. Medición solidos sedimentables de la muestra de agua.



Fuente: Autor

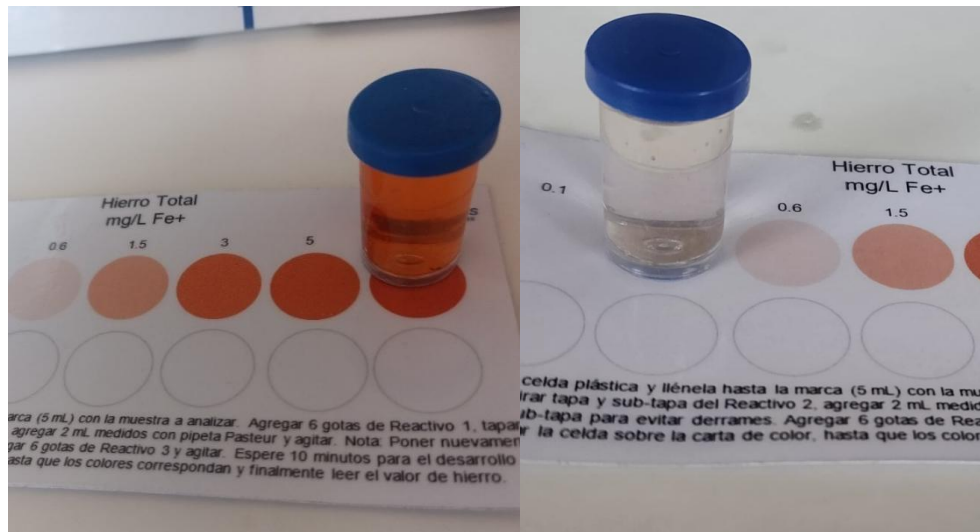
3.3.5. Medición con kits de hierro

Lo primero que se realizó fue tomar 5 ml de cada muestra y se agregó 6 gotas del reactivo uno, luego se tapó y agitó, después se agregó 2 ml del reactivo dos y nuevamente se tapó y

agito, el siguiente paso fue agregar 6 gotas del reactivo 3 se tapó y agito, así mismo se esperó 10 minutos, se observó la coloración y finalmente se leyó el valor del hierro, ver Figura 8.

De igual manera este procedimiento se llevó a cabo en las 5 muestras de agua y los valores oscilaron entre 3 mg/L hasta el valor máximo de 6 mg/L.

Figura 8. Medición de la concentración de hierro de la muestra de agua.



Fuente: Autor.

3.4. DISEÑO DE PROTOTIPOS

3.4.1. Diseño del prototipo de humedal artificial

Para el diseño del prototipo de humedal artificial se utilizaron herramientas de diseño como AutoCAD y SketchUp en los cuales se generaron planos y modelos en tres dimensiones para posteriormente realizar la construcción.

3.4.2. diseño del prototipo de biorreactor

Para el diseño del prototipo de biorreactor se utilizaron herramientas de diseño como AutoCAD y SketchUp en los cuales se generaron planos y modelos en tres dimensiones para posteriormente realizar la construcción.

3.5. CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO

3.5.1. Construcción de humedal artificial

Para la construcción de humedal artificial se utilizó como base fundamental la estructura en forma de sedimentador y su prototipo en vidrio y laminas metálicas, además de ello el humedal artificial se dividió en dos secciones de filtro en las cuales se utilizaron:

Para el primer filtro:

- Buchón de agua o lirio acuático (*Eichhornia Crassipes*)
- Arena
- Carbón activado
- Rocas porosas
- Grava

Segundo filtro:

- Buchón de agua o lirio acuático (*Eichhornia Crassipes*)
- Arena
- Rocas porosas
- Bomba de oxígeno sumergible

En la construcción del primer filtro se realizó una capa de materiales filtrantes con diferentes espesores comprendiendo que el agua ingresa de manera ascendente, en la parte profunda se colocó el carbón activado, posteriormente se colocó la grava y arena sílice, y finalmente rocas porosas ya que es el material que cuenta con mayor porosidad, este orden de materiales permite la reducción del metal contaminante hierro y residuos presentes en el agua, este se caracteriza por ser filtro rápido pero que permite la remoción de sólidos, ramas, entre otros, posteriormente se agregó la planta acuática *Eichhornia Crassipes* para que sus raíces permitan la remoción de hierro, este también cuenta con una pared metálica con agujeros que

evita que esos solidos ingresen al segundo filtro, de igual manera estas características filtrantes ayudan a cambiar el color del agua debido a que el carbón activado y las rocas porosas absorben en su mayoría las partículas de hierro presentes en esta las cuales son causantes de la tonalidad anaranjada.

Por otra parte, para el segundo filtro se realizó dos capaz filtrantes que son arena sílice, rocas porosas y tres plantas acuáticas *Eichhornia Crassipes*, sin embargo a este filtro también se le añadió una bomba de oxígeno sumergible la cual brinda oxígeno a la estructura y permite la supervivencia de las plantas, estas características permitieron que el agua tuviera una reducción en el metal hierro y de igual manera se cuenta con otra lamina metálica con una superficie dentada triangular en la parte superior, esto con la finalidad de mantener un flujo laminar e impedir el paso de sedimentos no deseados a la última sección.

Por último, el humedal artificial cuenta con una sección final sin ningún tipo de filtro que retuvo el agua ya filtrada así mismo esta sección tiene una inclinación que permite la retención de sedimentos no deseados que pudieron atravesar el segundo filtro para posteriormente ser llevada de la manera más optima posible al biorreactor.

3.5.2. Construcción del biorreactor

Para la construcción del biorreactor se utilizó como base fundamental la estructura en forma cilíndrica y en acero inoxidable, de igual manera se utilizó un motor de 9 voltios que permite el movimiento turbulento del agua, lo cual estimula la degradación del hierro por parte de las bacterias, en la parte del cultivo se colocaron a encubar las bacterias reductoras de hierro y por último se ingresaron al biorreactor.

3.6. SELECCIÓN DEL MICROORGANISMO.

Para la selección del microorganismo, se tuvo en cuenta la revisión bibliográfica, donde posteriormente se determinaba que las bacterias con las características más óptimas para la remoción de hierro en aguas contaminadas con hierro eran las *Acidithiobacillus ferrooxidans*

y otras bacterias oxidantes, por lo tanto se realizó una incubación de las mismas en caldo nutritivo y previamente se incorporaron al biorreactor, comprendiendo que estos microorganismos tienden a sobrevivir en ambientes arduos con altas y bajas temperaturas lo que fue bastante positivo, ya que este factor no influía directamente en el proceso de remoción de hierro.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este apartado se observaron los resultados y sus respectivos análisis tanto de los parámetros de laboratorio previos de los cinco muestreos de las aguas provenientes de vertimientos mineros en Samacá, Boyacá, de igual manera los diseños, construcción de estos y los resultados finales.

4.1. ANÁLISIS PARA LOS PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS DE CALIDAD DEL AGUA EN 3 PUNTOS MINEROS DE SAMACÁ, BOYACÁ.

En esta sección se pueden observar los parámetros de laboratorio analizados con anterioridad al tratamiento, en donde se midieron parámetros como lo son el pH, el oxígeno disuelto, la conductividad, los sólidos disueltos totales, la temperatura, DQO, DBO y concentración de hierro.

A continuación, se presenta la Tabla 2 en la que se detallan los parámetros físicoquímicos de la muestra número 1.

Tabla 2. *Parámetros físicoquímicos muestra número 1.*

PARÁMETRO	MEDICIÓN	VALOR NORMATIVO
pH	3.15	6-9
Porcentaje de Oxígeno Disuelto	29.70%	Análisis y reporte
Oxígeno Disuelto	1.98 Mg/L	< 4 Mg/L
Conductividad	1008 μ S/cm	1000

PARÁMETRO	MEDICIÓN	VALOR NORMATIVO
Sólidos Disueltos Totales	354 Ppm	< 2000 Ppm
Temperatura	16.91 °C	-
Sólidos Suspendidos Totales	2.5 Mg/L	50 Mg/L
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO).	7.45 Mg/L DBO5	50 Mg/L
Demanda Química de Oxígeno (DQO).	37.3 Mg/L	150 Mg/L
Sólidos Sedimentables	2,5	
Hierro	6 Mg/L	2 Mg/L

Fuente: Autor con base en la Resolución 0631 de 2015.

Los resultados presentados en la Tabla 2 demuestran que la Muestra 1 excede los límites permisibles establecidos por la Resolución 0631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, específicamente en los parámetros de pH, Conductividad eléctrica y concentración de Hierro total, lo que representa una condición ambiental crítica desde el punto de vista del vertimiento y salud ecosistémica.

De igual manera se puede evidenciar que el valor de pH, se encuentra fuera de rango establecido lo que indica la presencia de vertimientos con características ácidas, mientras que la conductividad elevada refleja una gran carga iónica, lo cual es bastante común en aguas que tienen presencia de metales disueltos, por otra parte la concentración de Hierro supera en gran medida el límite permitido, lo cual confirma el estado contaminado del recurso hídrico y se puede constituir un riesgo para los ecosistemas cercanos.

Así mismo al comparar los resultados entre las cinco muestras, se observa una similitud entre sus parámetros fisicoquímicos, lo que indica que existe una fuente común de contaminación minera sin mecanismos de control o estrategias de mitigación. De igual manera por presentar los niveles más altos de hierro (Fe), esta muestra fue la seleccionada ya fue el caso más

representativo para realizar la prueba del sistema de tratamiento integrado por humedal artificial y biorreactor.

Tabla 3. *Parámetros fisicoquímicos muestra número 2.*

PARÁMETRO	MEDICIÓN	VALOR NORMATIVO
pH	3.9	6-9
Porcentaje de Oxígeno Disuelto	30.50%	Análisis y reporte
Oxígeno Disuelto	2.2 Mg/L	< 4 Mg/L
Conductividad	1104 μ S/cm	1000
Sólidos Disueltos Totales	227 Ppm	< 2000 Ppm
Temperatura	17.73 °C	-
Sólidos Suspendidos Totales	2.9 Mg/L	50 Mg/L
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO).	6.86 Mg/L DBO5	50 Mg/L
Demanda Química de Oxígeno (DQO).	48.96 Mg/L	150 Mg/L
Hierro	5 Mg/L	2 Mg/L

Fuente: Autor con base en la Resolución 0631 de 2015.

Se puede determinar según los resultados presentados en la Tabla 3 que la Muestra 2 no cumple con los límites permisibles que se encuentran establecidos en la Resolución 0631 de 2015, particularmente en los parámetros de pH, conductividad eléctrica y concentración de

hierro total, lo cual evidencia una alteración significativa de la calidad del agua en el punto de muestreo evaluado, es importante reconocer que aunque la muestra fue recolectada en un sector diferente al de los otros puntos de muestreo, en esta se observa una alta similitud en los parámetros fisicoquímicos, lo que sugiere una inconsistencia, esto se puede deber a las fuentes hídricas y su distribución, de igual manera esto refuerza la hipótesis de que presuntamente existe una contaminación dispersa, esto se puede deber a que no existen estrategias de prevención o de mitigación ambiental efectivas, por otra parte la concentración de hierro en esta muestra no es la más elevada, sigue estando alta comparado a la normativa, reconociendo así que existe la necesidad de tratamientos específicos que sean orientados a la remoción eficiente de metales presentes en el agua, incluso en escenarios donde los valores no alcanzan máximos críticos.

Tabla 4. *Parámetros fisicoquímicos muestra número 3.*

PARÁMETRO	MEDICIÓN	VALOR NORMATIVO
pH	4	6-9
Porcentaje de Oxígeno Disuelto	28.90%	Análisis y reporte
Oxígeno Disuelto	1.93 Mg/L	< 4 Mg/L
Conductividad	708 μ S/cm	1000
Sólidos Disueltos Totales	450 Ppm	< 2000 Ppm
Temperatura	16.78 °C	-
Sólidos Suspendidos Totales	2.78 Mg/L	50 Mg/L
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO).	7.86Mg/L DBO5	50 Mg/L

PARÁMETRO	MEDICIÓN	VALOR NORMATIVO
Demanda Química de Oxígeno (DQO).	55.48 Mg/L	150 Mg/L
Hierro	3 Mg/L	2 Mg/L

Fuente: Autor con base en la Resolución 0631 de 2015.

Los resultados presentados en la Tabla 4 evidencian que la muestra 3 tampoco cumple con los límites establecidos por la Resolución 0631 de 2015 para vertimientos en cuerpos de agua superficiales, destacando dos parámetros críticos, como es el caso del donde el valor registrado es de 4 lo que indica que se encuentra por debajo del rango permisible el cuál esta de 6 a 9 indicando así una acidez la cual puede comprometer tanto la estabilidad química del agua como la supervivencia de diversos microorganismos, así mismo se determinó una concentración de hierro de 3 mg/L, superando así el límite de 2.0 mg/L establecido en la norma, aunque esta no es muy alta si se establece que existe una carga férrica importante, así mismo la baja concentración de oxígeno disuelto de 1.93 mg/L refleja condiciones hipóxicas las cuales tienden a limitar la respiración aerobia y reducen la eficiencia en procesos biológicos de tratamiento.

Tabla 5. *Parámetros fisicoquímicos muestra número 4.*

PARÁMETRO	MEDICIÓN	VALOR NORMATIVO
pH	4.5	6-9
Porcentaje de Oxígeno Disuelto	40.90%	Análisis y reporte
Oxígeno Disuelto	2.95 Mg/L	< 4 Mg/L
Conductividad	609 μ S/cm	1000

PARÁMETRO	MEDICIÓN	VALOR NORMATIVO
Sólidos Disueltos Totales	210 Ppm	< 2000 Ppm
Temperatura	16.95 °C	-
Sólidos Suspendidos Totales	2.3 Mg/L	50 Mg/L
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO).	7.65 Mg/L DBO5	50 Mg/L
Demanda Química de Oxígeno (DQO).	54.91 Mg/L	150 Mg/L
Hierro	4.5 Mg/L	2 Mg/L

Fuente: Autor con base en la Resolución 0631 de 2015.

En la Tabla 5 se puede identificar que los parámetros fisicoquímicos de la muestra 4 revela un perfil mixto ya que esta presenta indicadores positivos en varios aspectos, pero con dos parámetros en estado crítico es decir que incumplen la norma, lo que justifica un tratamiento especializado, entre estos valores se encuentra el pH el cual está en 4.5, esta condición muestra que el vertimiento es ácido, así mismo esta muestra presenta una concentración de hierro de 4.5 mg/ L y se determina que la concentración excede el límite permitido más del doble, lo que indica la presencia de cargas férricas considerables, recalando que este elemento bajo condiciones ácidas, puede mantenerse soluble y así aumentar su toxicidad, comprendiendo con esto que estas características hacen que la muestra sea óptima para el tratamiento en el sistema integrado de humedal artificial y biorreactor, cuya capacidad para aumentar el pH y precipitar hierro se puede evaluar en escenarios extremos.

Tabla 6. *Parámetros fisicoquímicos muestra número 5.*

PARÁMETRO	MEDICIÓN	VALOR NORMATIVO
pH	3.76	6-9
Porcentaje de Oxígeno Disuelto	46.1%	Análisis y reporte
Oxígeno Disuelto	3.3 Mg/L	< 4 Mg/L
Conductividad	1371 μ S/cm	1000
Sólidos Disueltos Totales	685 Ppm	< 2000 Ppm
Temperatura	17.73 °C	-
Sólidos Suspendidos Totales	2.4 Mg/L	50 Mg/L
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO).	6.76 Mg/L DBO5	50 Mg/L
Demanda Química de Oxígeno (DQO).	47.45 Mg/L	150 Mg/L
Hierro	6 Mg/L	2 Mg/L

Fuente: Autor con base en la Resolución 0631 de 2015.

Como se evidencia en la *Tabla 6* la muestra cinco presenta un perfil de nivel crítico, esto en los parámetros de pH, Conductividad y concentración de hierro, ya que su pH se encuentra en 3.76 se indica que sus características son de tipo ácido, por otra parte su conductividad también se encuentra fuera del rango lo que indica una elevada carga iónica, esto generalmente se asocia a contaminación por sales y metales disueltos, por otra parte su concentración de hierro se encuentra en una de las más elevadas lo que indica que existen presencias de cargas férricas, sin embargo se puede decir que al existir un hierro elevado y un pH bajo se compromete la vida acuática y por ende se limitan los tratamientos

convencionales, por lo que el modelo del sistema integrado propuesto en este proyecto constituye una alternativa de tipo sostenible y tecnológicamente adaptable.

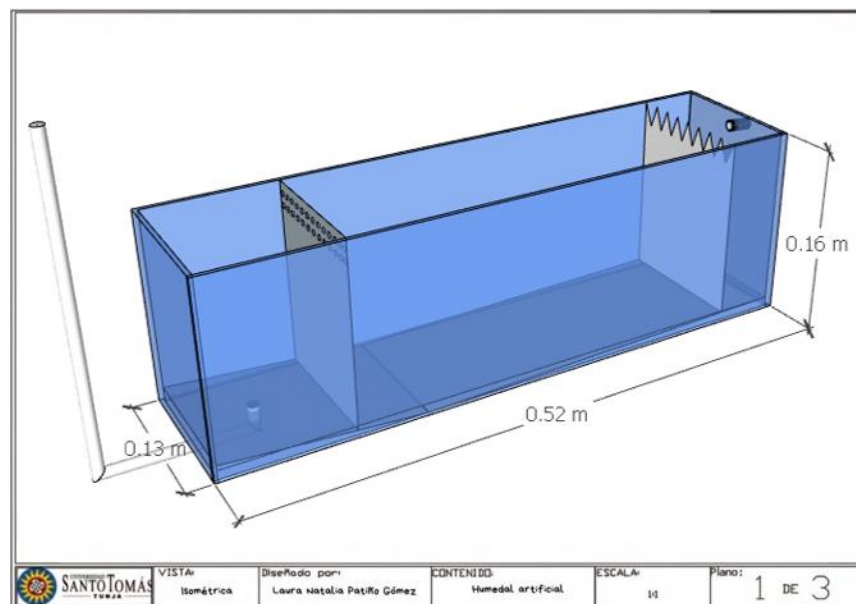
4.2. DISEÑO DE LOS PROTOTIPOS

4.2.1. Diseño del prototipo de humedal artificial

El diseño del prototipo de humedal artificial se basó en criterios como las secciones diferenciadas donde se generará un proceso individual el cual generara un tratamiento óptimo para las condiciones del agua a tratar, a continuación, se observan los diseños de las estructuras del humedal artificial en el cual se detallan las diferentes vistas con el fin de generar una visión clara tanto de las medidas como de su morfología y secciones individuales.

Comprendiendo así que el uso combinado de estas plataformas favoreció una transición fluida entre diseño conceptual y construcción física, por ende reduciendo los diversos riesgos operativos y asegurando con esto que el prototipo responda con la debida precisión a los objetivos del proyecto.

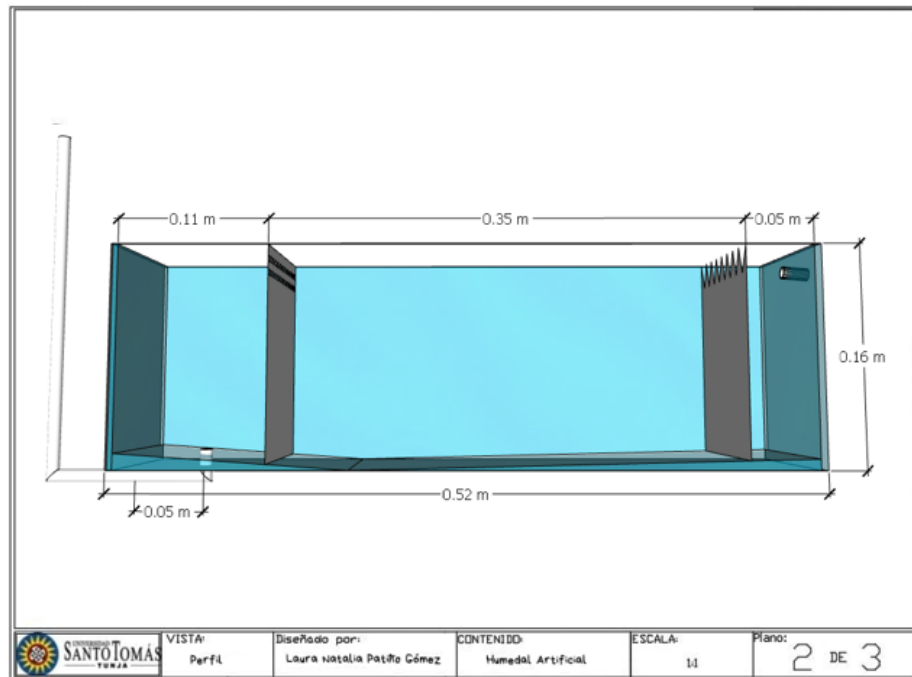
Figura 9. *Diseño del humedal artificial en vista isométrica.*



Fuente: Autor

La Figura 9 presenta una representación isométrica integral del humedal artificial, donde proporciona una vista tridimensional la cual permite comprender la distribución espacial y funcional de cada uno de sus componentes clave, así mismo esta visualización está segmentada en tres secciones, cada una diseñada para representar las fases estructurales y operativas del sistema, facilitando la interpretación tanto técnica como didáctica.

Figura 10. *Diseño de humedal artificial en vista perfil.*



Fuente: Autor

La Figura 10 presenta una vista en perfil detallada del humedal artificial, donde se enfatiza en las dimensiones estructurales claves del sistema, reconociendo así que esta representación facilita la lectura precisa de todas las acotaciones de largo y alto, esenciales para la validación geométrica y constructiva del diseño, donde se evidencia que el perfil está segmentado en tres secciones longitudinales, cada una con una función específica dentro del tratamiento:

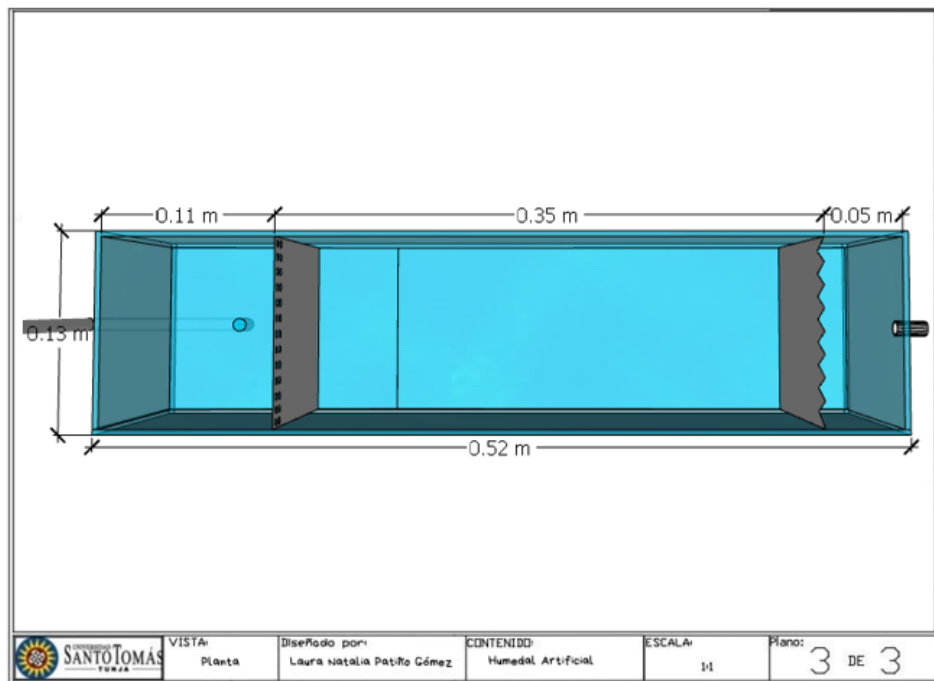
Sección 1: Cuenta con 0.11 metros de longitud, esta sirve principalmente como entrada inicial del flujo esta sección está diseñada para ser una entrada de flujo rápida orientada a una remoción de sólidos grandes, una filtración que remueva color y turbidez.

Sección 2: Esta cuenta con 0.35 metros de longitud, esta es la más extensa, ya que corresponde al corazón del proceso biológico, en esta es donde se alojan los principales lechos filtrantes y la vegetación reactiva, en este caso buchón de agua.

Sección 3: Esta cuenta con 0.05 metros y representa la salida final del efluente tratado hacia el biorreactor, se pequeño tamaño busca estabilización del flujo y terminar de sedimentar diversos sólidos, para que no ingresen a la siguiente estructura,

Así mismo las acotaciones detalladas garantizan el cumplimiento de cada una de las especificaciones de obra y también permiten simular el comportamiento hidráulico a escala, evaluando así los tiempos de retención y con ellos facilitar el modelo de los gradientes de concentración.

Figura 11. *Diseño del humedal artificial en vista planta.*

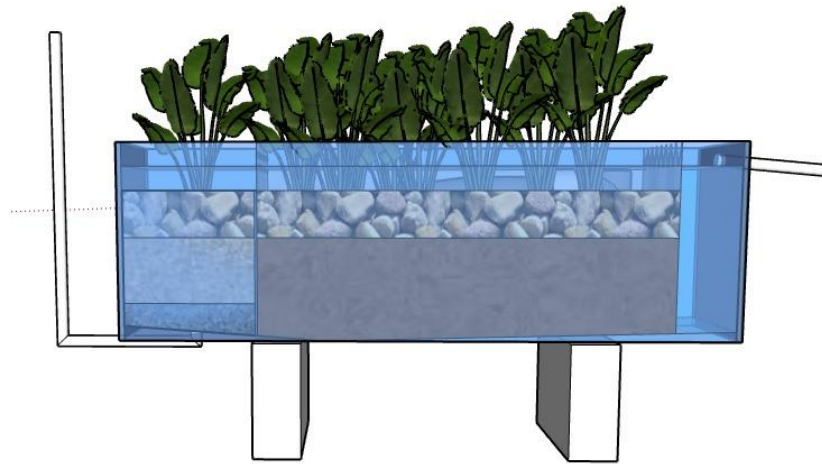


Fuente: Autor.

En la Figura 11 se puede apreciar la vista en planta del diseño del humedal artificial en la cual se detallan acotaciones de las medidas como el ancho de la estructura y el largo total, además de ello se puede observar en la zona media de la estructura la línea divisoria de las

pendientes que tiene la estructura desde la sección inicial hasta la sección final del recorrido del agua en el proceso de tratamiento.

Figura 12. *Ilustraciones del humedal artificial.*



Fuente: Autor.

La Figura 12 ilustra el diseño consolidado del humedal artificial en una vista que destaca la trayectoria completa del flujo hídrico a través de sus tres secciones operativas, así mismo se esta la representación sintetiza el sistema de tratamiento, facilitando así la comprensión del diseño de manera más adecuada.

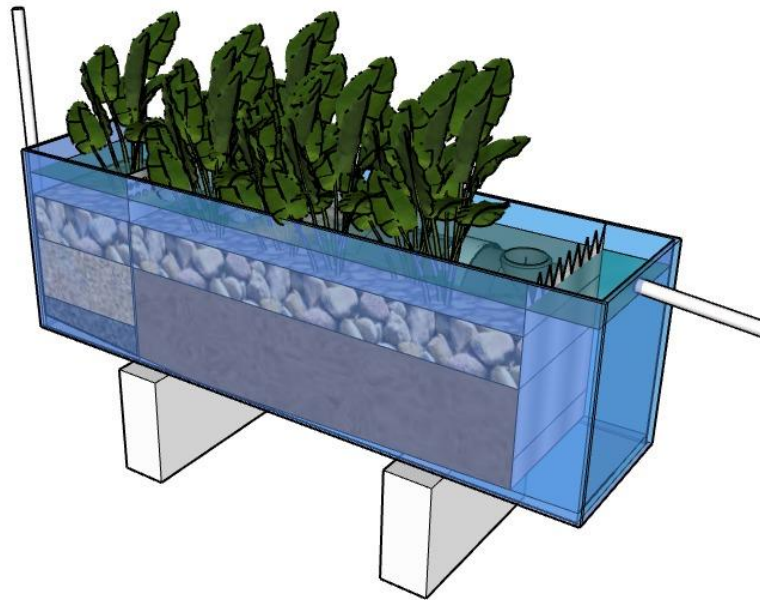
La primera sección cumple la función de filtración inicial, y esta se encuentra compuesta por tres capas de lechos filtrantes los cuales se abordaron de esta manera para la adecuada filtración, estas capas están conformadas por grava, arena, carbón activado, piedras porosas, y por último una planta acuática conocida como buchón de agua, los cuales están diseñados para la remoción rápida de solidos grandes y del metal pesado hierro.

La segunda sección, corresponde al núcleo o el corazón del proceso de tratamiento, en esta sección, se encuentra el mayor volumen y por ende el mayor tiempo de retención hidráulico,

está maneja los procesos biológicos y fisicoquímicos intensivos, ya que cuenta con las plantas acuáticas, lechos filtrante y bomba de oxigenación.

Por último, en la tercera sección, funciona como cámara de estabilización y de retoques finales, ya que aunque sus dimensiones son reducidas, esta fase es crucial para garantizar la calidad del efluente tratado antes de su ingreso al biorreactor.

Figura 13. *Vista isométrica del humedal artificial*



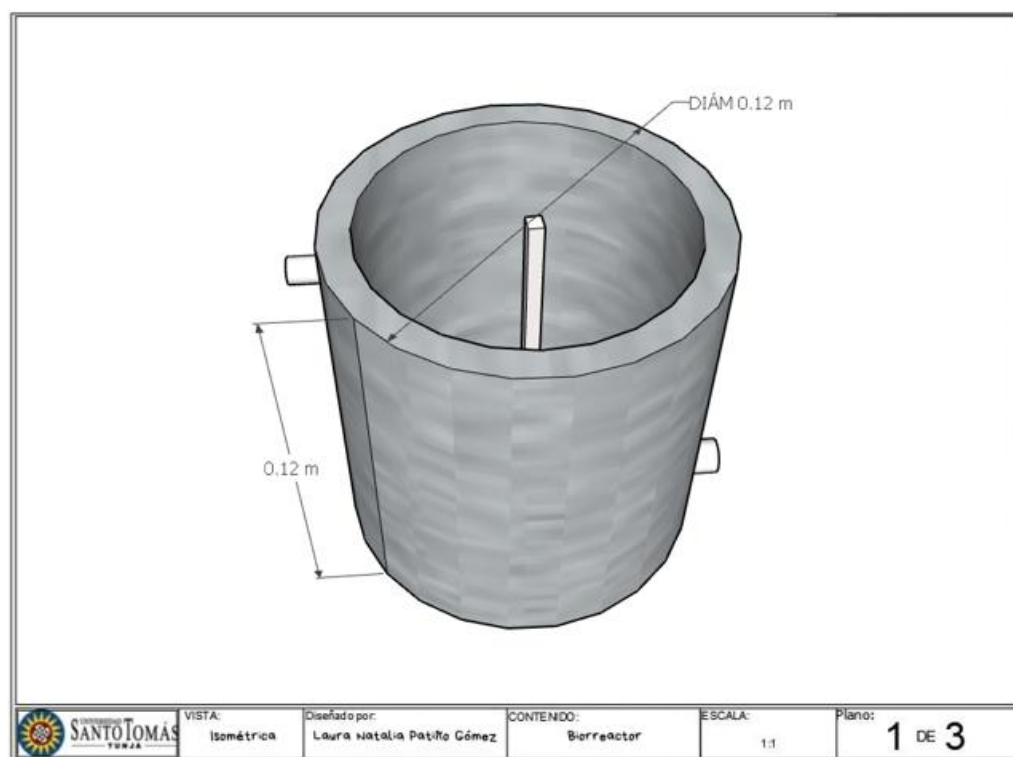
Fuente: Autor.

En la Figura 13 se aprecia una perspectiva más clara del humedal artificial en el cual se logra apreciar las especies de plantas encargadas de absorber los compuestos presentes en el agua además de los lechos filtrantes aplicados y las demás piezas del humedal siendo la mayoría de la estructura plasmada en vidrio con cierta pendiente para generar así el flujo laminar característico.

4.2.2. Diseño del prototipo de biorreactor.

En las siguientes figuras se puede observar el diseño del biorreactor en el cual se plasman las vistas y las anotaciones de las medidas.

Figura 14. Diseño de biorreactor en vista isométrica.

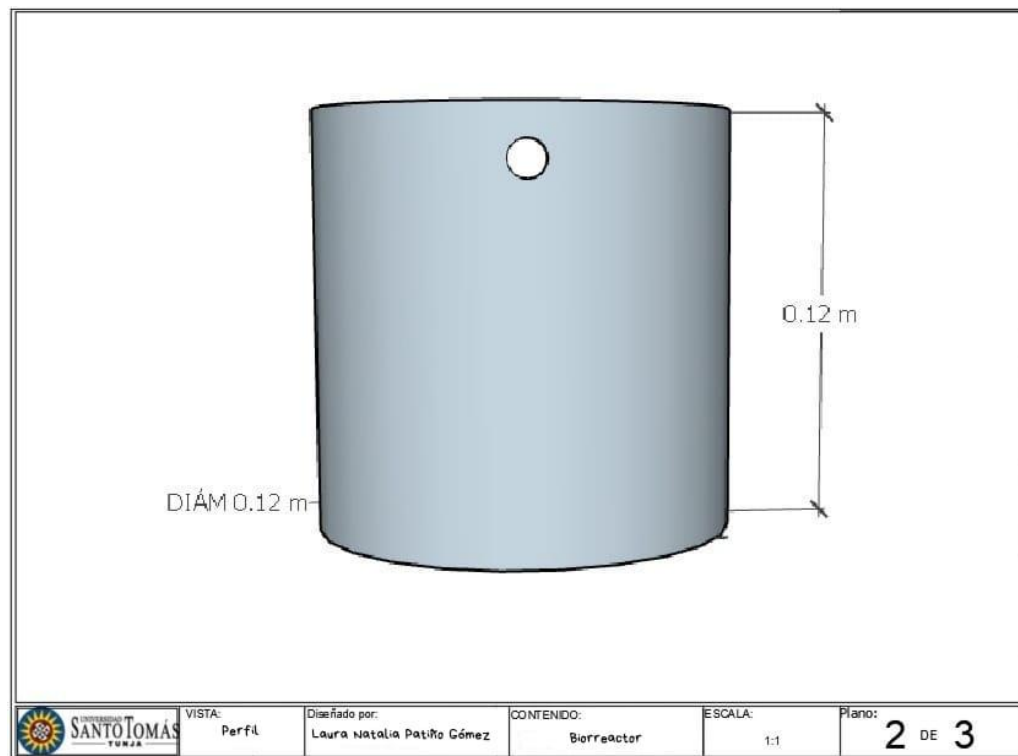


Fuente: Autor.

En la Figura 14 se observa la vista isométrica del biorreactor en el cual se detalla sus características como es la entrada de agua desde el humedal artificial y la salida del efluente, así mismo en el centro del diseño se puede observar el agitador mecánico, el cual es un elemento esencial para asegurar la mezcla homogénea del agua con las bacterias lo que promueve la distribución uniforme de oxígeno y contaminantes entre las bacterias activas, de igual manera el biorreactor actúa como una segunda etapa de tratamiento, posterior al humedal artificial, en este intensifican los procesos microbiológicos en condiciones

controladas, así mismo el agitador cumple un rol crucial que evita la sedimentación excesiva y mantiene el sistema en condiciones completamente óptimas para el contacto entre los microorganismos y los contaminantes.

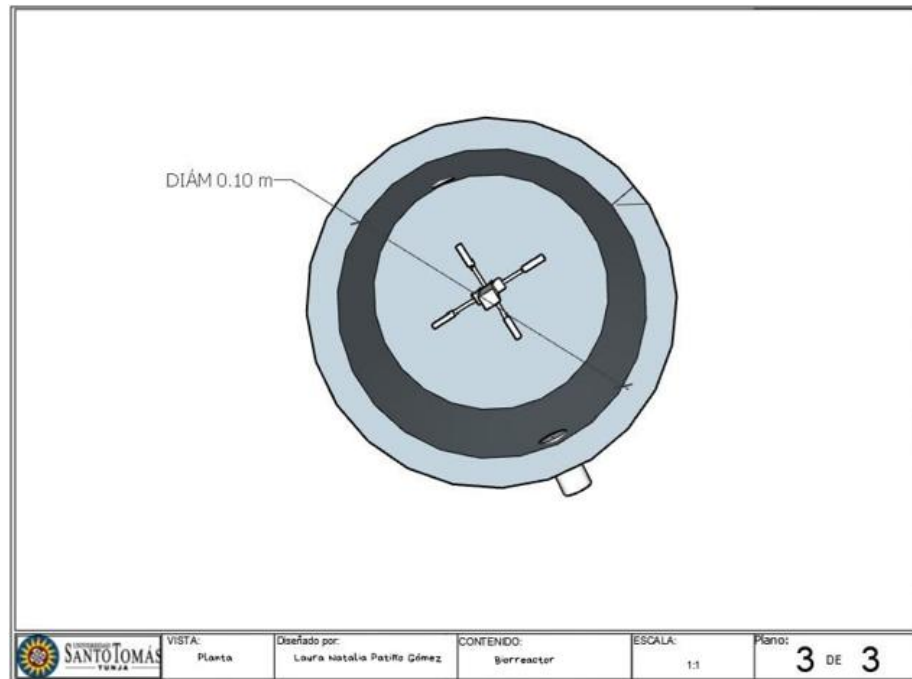
Figura 15. *Diseño de biorreactor vista perfil.*



Fuente: Autor.

En la Figura 15 se puede observar la vista en perfil del diseño del biorreactor en la cual se detalla la altura del biorreactor siendo 0.12 metros con un diámetro de 0.12 metros, comprendiendo que estas dimensiones se seleccionaron de manera estratégica para realizar pruebas piloto de carácter controlado, permitiendo así validar la eficiencia del sistema en condiciones de escala laboratorio

Figura 16. Diseño de biorreactor en vista planta.



Fuente: Autor.

En la Figura 16 se puede observar el biorreactor con un agitador mecánico, de igual forma en la vista planta mostrando las dimensiones del diámetro y siendo el grosor de las paredes de 2 milímetros., reconociendo que la agitación controlada mejora el contacto entre el efluente y los microorganismos especializados en la oxidación y reducción de hierro, lo que potencialmente incrementa las tasas de remoción del metal de hierro.

4.3. CONSTRUCCIÓN DE LOS PROTOTIPOS

4.3.1. Construcción del humedal artificial

En la construcción del prototipo del humedal artificial se tomó como base fundamental el diseño en el programa SketchUp para definir las capas de lechos filtrantes y también las capas vegetales, así mismo el proceso de construcción se realizó en el laboratorio en el cual se

tomaron los materiales mencionados previamente y se realizó la construcción de la estructura de vidrio, la composición de los lechos filtrantes, bomba de agua y laminas como se observa en la Figura 17:

Figura 17. Prototipo del humedal artificial.



Fuente: Autor.

Posteriormente la construcción del humedal artificial se agregaron las plantas, las cuales se distribuyeron en la sección uno y la sección dos del humedal, ya que en estas son las áreas de mayor carga contaminante y concentración de flujos esta disposición permitió maximizar el contacto entre el efluente y las raíces, fortaleciendo así los procesos de filtración y absorción justo en las zonas críticas del sistema, esto debido a que una vez lleno el humedal, la ubicación de *Eichhornia crassipes* influyó directamente en la formación de gradientes de concentración y en la sedimentación, lo que facilitó la retención de partículas y metales esto antes del ingreso al biorreactor, reconociendo así que la biomasa vegetal no solo actúa como filtro natural sino también como un estimulador biológico dentro del sistema de tratamiento, se observa en la Figura 18:

Figura 18. Organización de las plantas en el humedal artificial.

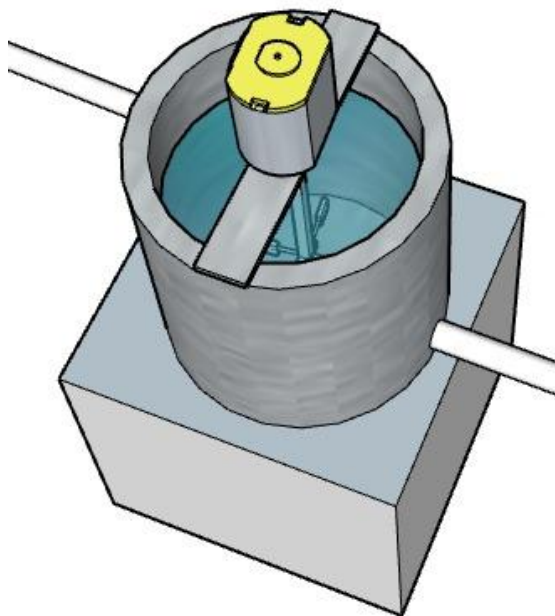


Fuente: Autor.

4.3.2. Construcción de biorreactor

Durante la etapa de desarrollo del prototipo de biorreactor, se utilizó el programa de SketchUp como plataforma de modelado tridimensional, esto con el fin de definir con precisión la estructura integral del sistema, incluyendo los componentes tanto mecánicos como biológicos esenciales, este mismo permitió la construcción virtual detallada del cuerpo cilíndrico del reactor, donde se incorporaron especificaciones como el volumen útil, el espesor de las paredes, el tipo de material, y por ultimo las conexiones hidráulicas.

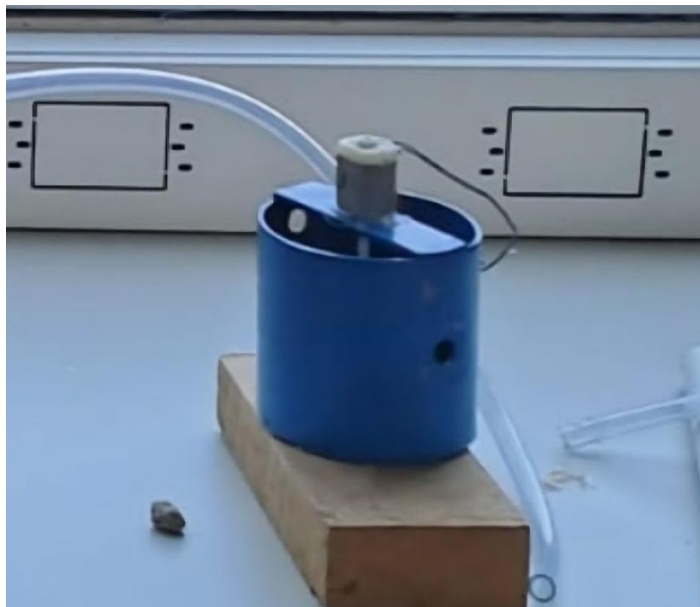
Figura 19. Organización de los complementos del biorreactor



Fuente: Autor.

En la Figura 19 se puede observar los complementos del biorreactor en el cual se implementó una lámina central en la parte superior utilizando el mismo material esto con el fin de implementar el motor de nueve voltios el cual impulsará la barra central que moverá el agitador y generará la agitación del agua con las bacterias mejorando así el tratamiento con los microorganismo, así mismo la incorporación del motor en el diseño digital permitió ajustar de manera correcta su ubicación, reconocer dimensiones y por último ver su acoplación al biorreactor, asegurando así su funcionalidad sin afectar la estabilidad estructural, es por esto que gracias a este modelado, se obtuvo una representación exacta y a su vez completa del prototipo, no solo como objeto físico, sino también como una unidad funcional dentro del sistema integrado de tratamiento de vertimientos mineros, lo que permitió observar su rendimiento bajo condiciones reales y así planificar su validación a un nivel experimental.

Figura 20. Construcción del biorreactor.



Fuente: Autor.

De igual manera en la Figura 20 se puede observar el cuerpo del biorreactor, el cual fue fabricado con lámina metálica inoxidable, que se seleccionó principalmente por su resistencia mecánica, su durabilidad en condiciones húmedas y la facilidad de manipulación en la fase de prototipo, así mismo este material permite asegurar la eficiencia del sistema, ya que evita fugas y facilita el acoplamiento de los otros componentes como es el caso del agitador, las conexiones hidráulicas y el motor. En la figura se observa la presencia de un soporte estructural el cual sostiene el motor, este soporte fue diseñado principalmente para mantener la estabilidad mecánica esto durante el proceso de agitación interna.

En virtud de lo anterior el motor acoplado al eje del agitador esto con el fin de proporcionar la energía necesaria y de esta manera generar una mezcla continúa asegurando con esto la dispersión homogénea de las bacterias incorporadas y así generar las condiciones más optimas. Por ende, se determinó que la agitación controlada es un proceso fundamental para estimular el metabolismo bacteriano, especialmente en la remoción de hierro disuelto mediante procesos de oxidación, de reducción y de bioadsorción.

Así mismo se determinó que el movimiento evita la sedimentación prematura de los microorganismos y también mantiene una distribución uniforme del flujo y nutrientes dentro del biorreactor, es por esto que el modelo en escala permite validar la geometría, configurar su mecánica y la dinámica interna del sistema antes de escalarlo a condiciones reales, además, este prototipo puede actuar como base para realizar diversos ensayos cinéticos, simulaciones hidráulicas y pruebas de eficiencia, las cuales pueden ir orientadas a perfeccionar el diseño final del tratamiento.

Figura 21. Incorporación de las bacterias.



Fuente: Autor.

De igual manera en la Figura 21 ilustra el momento de la incorporación bacteriana dentro del biorreactor, esta es etapa clave ya que marca el inicio del proceso biológico de tratamiento de aguas contaminadas con hierro, en este caso las bacterias fueron incorporadas en condiciones controladas de temperatura y pH, esto con el objetivo de activar su metabolismo y así permitir la transformación de hierro disuelto, así mismo se emplearon cepas adaptadas a ambientes férricos, seleccionadas por su capacidad de oxidar hierro y facilitar su precipitación, es importante reconocer que este sistema fue diseñado con un tiempo de retención aproximado de 5 días, el cual fue suficiente para asegurar el contacto entre el agua

contaminada y las cepas bacterianas, comprendiendo que esta temporalidad favorece los procesos cinéticos de oxidación y los procesos de bioadsorción, así como la formación de biomasa y lodos férricos que son sedimentables.

Por otra parte en la etapa final de remoción se determinó que durante este periodo, se lleva a cabo la remoción final del hierro total, logrando así niveles de depuración superiores esto mediante la acción conjunta de los microorganismos y los procesos fisicoquímicos complementarios, en este caso se monitorearon parámetros como concentración residual de Fe, la turbidez, la conductividad y el pH, los cuales evidenciaron una mejora significativa en la calidad del agua tratada, es por ello que esta fase permitió validar la eficacia del modelo integrado de humedal artificial y biorreactor, sirviendo casi como base para estudios de escalabilidad, optimización y futuras replicaciones en los vertimientos mineros.

4.4. BALANCE DE MASAS DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO

Con base en la metodología se buscó realizar un balance de masas teniendo en cuenta el funcionamiento del sistema de tratamiento, para este caso se tuvieron en cuenta diversas reacciones dentro del sistema así mismo se definió que este sistema es batch por lo tanto en el humedal artificial se dividieron tres secciones y por último en el biorreactor una sección.

Para comprender este proceso se realizaron los cálculos de concentración y de la constante de reacción de cada una de las secciones como se evidencia a continuación:

4.4.1. Cálculos para el primer filtro del humedal artificial

Datos tomados en el primer filtro del humedal artificial.

pH: 3.15

Temperatura: 17.63 °C

Concentración inicial de Fe: 6 Mg/L

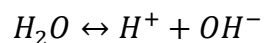
Peso molecular de Fe: 55.85 g/mol

$$Fe\text{ inicial} = \frac{\text{concentracion inicial de Fe}}{\text{Peso molecular de Fe}} \quad (4-1)$$

$$\mathbf{Fe\text{ inicial}} = \frac{6\text{ mg/L}}{55.85\text{ g/mol}} = 0.1074\text{ mmol/L} = 1.074 \times 10^{-4}\text{ mol/L}$$

Ahora se calcula $[OH^-]$ con el pH de 3.15.

Se utiliza la propiedad del agua a 25°C para sintetizar la ecuación, ya que esta temperatura no es muy alejada a los 17.63°C, por lo tanto:



Donde se aplica logaritmos y quedaría:

$$\begin{aligned} -\log K_w &= -\log([H^+]) - \log([OH^-]) \\ &= pH + pOH = 14 \end{aligned}$$

Se utiliza la cinética para la oxidación de hierro.

Por ende, la cinética de oxidación de hierro en agua es:

$$Vel = K_{theo} * [Fe] * [O_2] * [OH^-]^2 \quad (4-2)$$

Donde:

$$K_{theo} = 1.0 \times 10^{13} M^{-3} * S^{-1}$$

$$[O_2] \text{ a } 17^\circ C = 9.5 \text{ Mg/L} \rightarrow \frac{9.5}{32} = 0.2969 \text{ mmol/L} = 2.969 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$$

Entonces:

$$K_{efectivo} = 1.0 \times 10^{13} * (2.969 \times 10^{-4}) * (1.41 \times 10^{-11})^2$$

$$K_{efectivo} = 1.0 \times 10^{13} * (2.969 \times 10^{-4}) * (1.99 \times 10^{-22})$$

$$K_{efectivo} = 5.91 \times 10^{-13} s^{-1}$$

Se realiza la conversión de K a $días^{-1}$

$$K = 5.91 \times 10^{-13} s^{-1} * 86400 s/día$$

$$K = 5.11 \times 10^{-8} días^{-1}$$

Por último se realizó el cálculo de la concentración comprendiendo que el tiempo de retención del agua es de 2 minutos.

$$C = C_0 * e^{-K*t}$$

(4-3)

$$C = 6 * e^{-5.11 \times 10^{-8} * 0.0013889}$$

$$C = 6 * e^{-7.096 \times 10^{-11}} = 6 * (1 - 7.096 \times 10^{-11})$$

$$C = 6 - 4.26 \times 10^{-10} \text{ Mg/L}$$

$$C = 5.9999999996 \text{ Mg/L}$$

En este proceso es importante recalcar que el primer filtro es un filtro rápido que busca remover sólidos y coloración del agua, por lo tanto, su tiempo de retención es de aproximadamente dos minutos, teniendo en cuenta esto se puede determinar que en el primer filtro prácticamente no existe remoción en la concentración de hierro presente en el agua.

4.4.2. Cálculos para el segundo filtro del humedal artificial

Datos tomados para el segundo filtro del humedal artificial

Concentración inicial: $C_0 = 6 \text{ Mg/L}$

Concentración final: $C = 4.5 \text{ Mg/L}$

Tiempo: $t = 5 \text{ días}$

Se utiliza ecuación de primer orden

$$C = C_0 * e^{-K*t} \rightarrow K = -\frac{1}{t} \ln\left(\frac{C}{C_0}\right) \quad (4-4)$$

$$K = -\frac{1}{5} \ln\left(\frac{4.5}{6}\right) = -0.2 * (-0.28768)$$

$$K = 0.0575 \text{ días}^{-1}$$

Para el segundo filtro se puede determinar que según la constante hallada cada día se elimina el 5,75% de la concentración de hierro, así mismo se puede determinar que a los 5 días se elimina un 25% de la concentración total lo que indica que es un proceso activo, pero no muy rápido.

4.4.3. Cálculos para la última cámara del humedal artificial.

4.4.4. Datos tomados para la última cámara del humedal artificial.

Concentración inicial: $C_0 = 6 \text{ Mg/L}$

Concentración final: $C = 4.5 \text{ Mg/L}$

Tiempo: $t = 2 \text{ minutos}$

Se determina que la concentración del filtro 2 es igual a la concentración de la cámara tres, ya que en este es un llenado para retirar y sedimentar sólidos, más no para reducir su concentración.

4.4.5. Cálculos para el biorreactor

Datos tomados para el biorreactor

Concentración inicial: $C_0 = 6 \text{ Mg/L}$

Concentración final: $C = 0.3 \text{ Mg/L}$

Tiempo: $t = 5 \text{ días}$

Se utiliza ecuación de primer orden

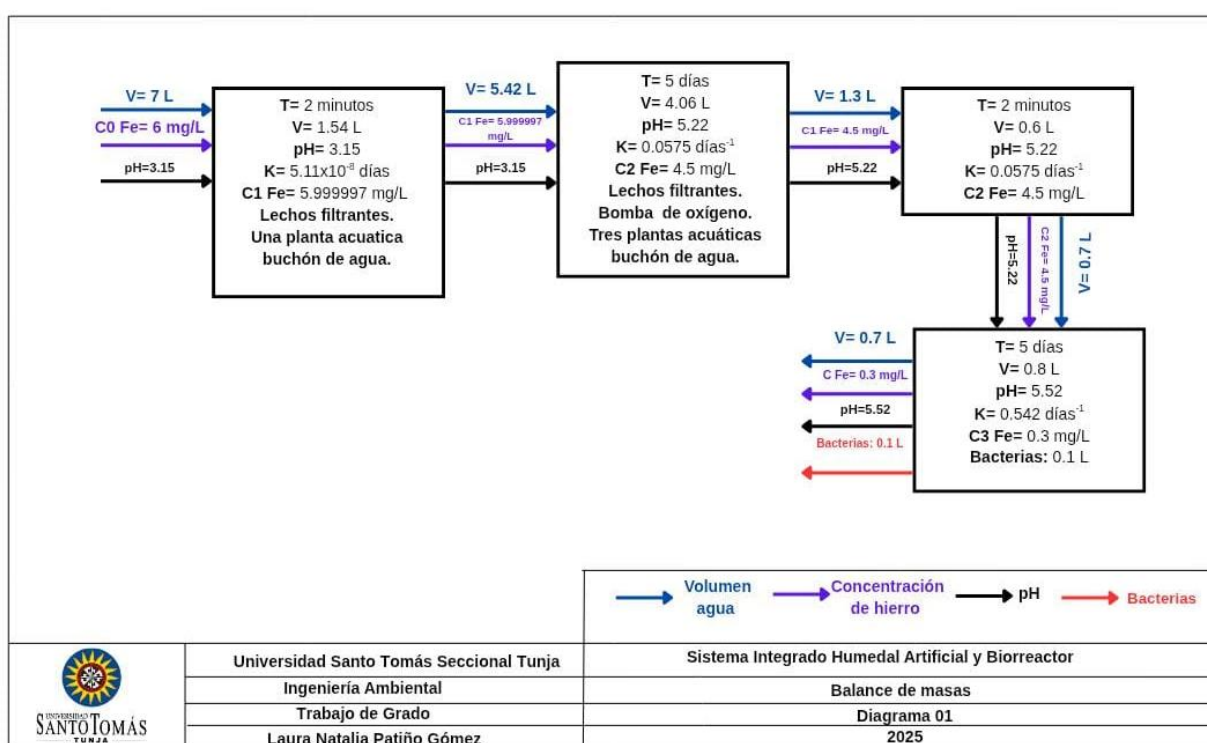
$$C = C_0 * e^{-K*t} \rightarrow K = -\frac{1}{t} \ln\left(\frac{C}{C_0}\right)$$

$$K = -\frac{1}{5} \ln\left(\frac{0.3}{6}\right) = -0.2 * (-2.708)$$

$$K = 0.542 \text{ días}^{-1}$$

Según los datos obtenidos se determinó que los microorganismos ferroxidantes más las características del biorreactor lograron reducir prácticamente el 90% de la concentración inicial en un tiempo menor a 5 días, lo que indica que este fue un proceso exitoso.

Figura 22. Balance de masas para el sistema de tratamiento integrando de humedal artificial y biorreactor.



Fuente: Autor.

La Figura 22 representa de forma estructurada un proceso tipo Batch, donde se evaluaron cuantitativamente las entradas y salidas de concentración de hierro, pH, volumen de operación, tiempo de retención y velocidad de reacción en cada etapa del tratamiento, así mismo este balance se constituye como una herramienta clave para validar la eficiencia del

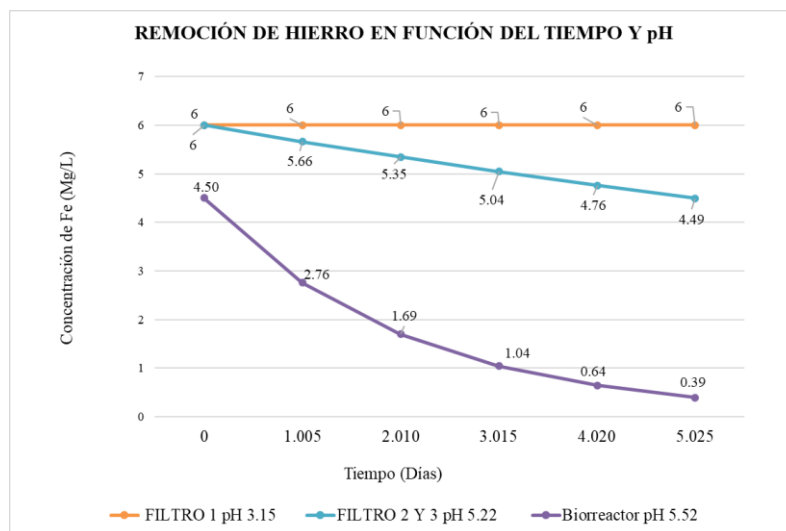
sistema integrado por humedal artificial y biorreactor y de igual manera se evidencia su comportamiento frente a las aguas contaminados con hierro.

Por otra parte se evidencia una reducción progresiva en la concentración de hierro total, partiendo desde 6 mg/L en la etapa inicial hasta 0.3 mg/L al final del proceso, lo que indica una eficiencia superior al 95% en su remoción esto bajo condiciones controladas, de igual forma el pH aumenta de manera gradual desde 3.15 hasta 5.22, señal de una neutralización del medio ácido, atribuible a la acción combinada de los filtros físicos y la actividad fitoquímica de las plantas *Eichhornia crassipes* utilizadas en el humedal

Así mismo determino que la constante de velocidad (K) varía en función del tipo de proceso es decir si filtración con biorreacción, lo que permite comparar dinámicas de remoción y optimizar el diseño de cada sección, para el caso de la filtración y biorremediación en el humedal la velocidad de remoción fue estándar esto se puede deber al tiempo de retención, mientras que en el biorreactor fue alta esto también se puede deber al pH, ya que generalmente se necesitan valores por encima de 5 para precipitar el hierro y acelerar su eliminación, lo cual no se hubiera obtenido sin el humedal debido a que los microorganismos ferroxidantes no modifican el pH por el contrario lo acidifican o como en este caso lo mantienen.

Es por ello que una vez el agua tratada alcanza condiciones favorables, el biorreactor intensifico el proceso a través de reacciones microbianas oxidativas, las cuales fueron respaldadas por la agitación controlada y tiempos de retención adecuados que para este caso fueron 5 días. Comprendiendo así que la presencia de cepas adaptadas permiten la conversión de hierro soluble a insolubles, lo que facilito su separación y por ende descontaminación, así mismo el balance de masas evidencia que el sistema opera con una consistencia técnica y resultados reproducibles, lo que lo convierte en una propuesta viable para tratar aguas contaminadas con hierro en los vertimientos mineros, esta aproximación permite, además, estimar diversas cinéticas de reacción, validar volúmenes óptimos de tratamiento por etapa y por ende proyectar futuras escalas de implementación.

Figura 23. Remoción de hierro en función del tiempo y pH.



Fuente: Autor.

En la Figura 23 presentada se puede ver la evolución de la concentración de hierro en función del tiempo, diferenciando el desempeño de los filtros del humedal artificial y del biorreactor bacteriano, en este también se incorpora el efecto del pH en cada etapa, el cuál es una variable clave para la eficiencia de la remoción como se evidencia a continuación:

Filtro 1 (pH 3.15): Este se evidencia en la figura con línea naranja, este filtro cuenta con una concentración constante de 6 mg/L esto durante los 5 días, indicando que este filtro, de acción rápida es decir 2 minutos, no produce remoción significativa, esto se debe a su baja retención hidráulica y de igual manera el pH ácido no es favorable para precipitación o adsorción. es por esto que su constante de velocidad (K) no es muy rápida.

Filtros 2 y 3 (pH 5.22): Este se evidencia en la figura con la línea azul muestra una reducción gradual desde 6 mg/L hasta 4.49 mg/L en 5 días, es decir una reducción del 25% lo que representa una eficiencia moderada por acción de los lechos filtrantes, un efecto positivo del pH ya que lo hace más neutro y por ende favorece procesos fisicoquímicos, de igual manera su constante de velocidad (k) es moderada.

Biorreactor (pH 5.22) : Este se evidencia en la figura con la línea morada, para este se tomó como punto de partida la concentración final del humedal es decir la del filtro 2 y 3 (4.5 mg/L), es aquí donde se evidencio que en tan solo 5 días, el biorreactor reduce el hierro a 0.39 mg/L, lo que representa una remoción superior al 91%, lo cuál puede ser relacionado a la actividad biológica de bacterias ferroxidantes, así mismo a la agitación controlada y tiempo de residencia eficiente y por ultimo a las condiciones de pH ajustadas 5.52, ya que estas son óptimas para precipitación del hierro (Fe), por ende su constante de velocidad (k) es rápida.

Analizando con esto que la gráfica confirma una sinergia entre el tratamiento físico biológico perteneciente del humedal y la acción microbiana intensiva del biorreactor, de igual manera el sistema logra una remoción total desde 6.0 mg/L a 0.39 mg/L en menos de 10 días, lo que concuerda como un diseño eficaz para los vertimientos mineros del municipio de Samacá, Boyacá. Así mismo el aumento progresivo del pH en cada etapa facilito la transición hacia unas condiciones óptimas para el proceso con los microorganismos, lo que valida el enfoque escalonado del tratamiento.

4.5. ANÁLISIS PARA LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS POSTERIOR AL TRATAMIENTO

En esta sección se pueden observar los parámetros de laboratorio analizados posteriormente al tratamiento y en donde se analizó únicamente una muestra esto debido a que las 5 muestras presentaban características similares en los parámetros identificados en el laboratorio siendo estos:

Tabla 7. Parámetro de pH antes y después del tratamiento.

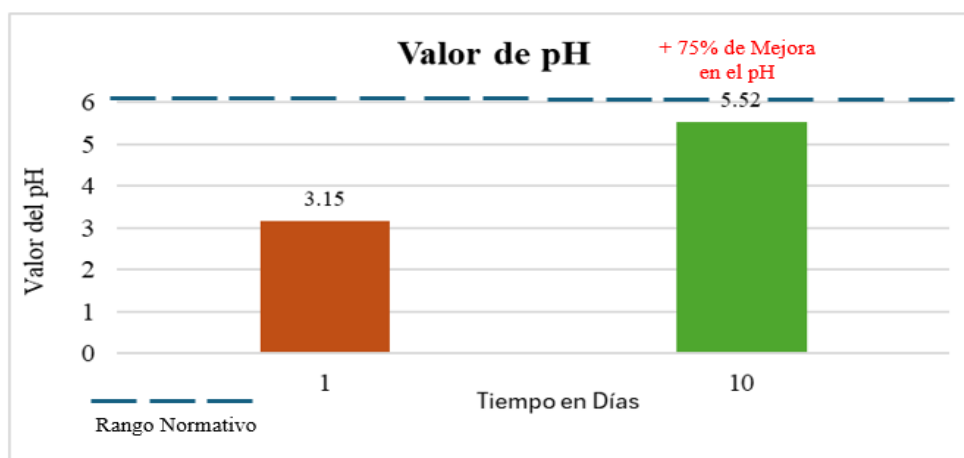
Valor de pH en el Agua Antes del Tratamiento.	Valor de pH en el Agua Después del Tratamiento.	Valor Normativo
3.15	5.52	6 - 9

Fuente: Autor y Resolución 0631 de 2015.

Como se puede evidenciar en la Tabla 7 el pH inicial es de 3.15, donde se confirma la presencia de un vertimiento altamente ácido, el cual tiende a ser incompatible con vida acuática y a su vez es limitante para tratamientos biológicos convencionales, sin embargo, después del tratamiento, se observa un incremento bastante significativo del pH donde llega a una medición de 5.52, acercándose así al límite inferior del rango normativo, este aumento se puede atribuir a la acción alcanizante de los lechos filtrantes del humedal, de igual forma la actividad reguladora que realizan las raíces de *Eichhornia crassipes*. y por último a la neutralización parcial por bacterias presentes en el biorreactor.

Por otra parte, se puede decir que el aumento del pH mejora la solubilidad y estabilidad de compuestos férricos, lo que facilito su precipitación, así mismo este favorece la actividad de las bacterias ferroxidantes, cuya eficiencia depende de un pH superior a 5, para facilitar la remoción de hierro disuelto en el agua.

Figura 24. Grafica del parámetro de pH antes y después del tratamiento.



Fuente: Autor.

En la Figura 24 sistema muestra una notable evolución positiva del pH en el intervalo de 10 días, en este existió un incremento absoluto de 2.37 unidades de pH, de igual manera presento una mejora del 75,24%, sin embargo, aunque el valor final aún no alcanza el mínimo normativo de 6, la Figura 24 evidencia un progreso significativo el cuál puede llegar a la

neutralización de la acidez, el cual al ser neutralizado permite la precipitación de hierro y una mayor tolerancia bacteriana.

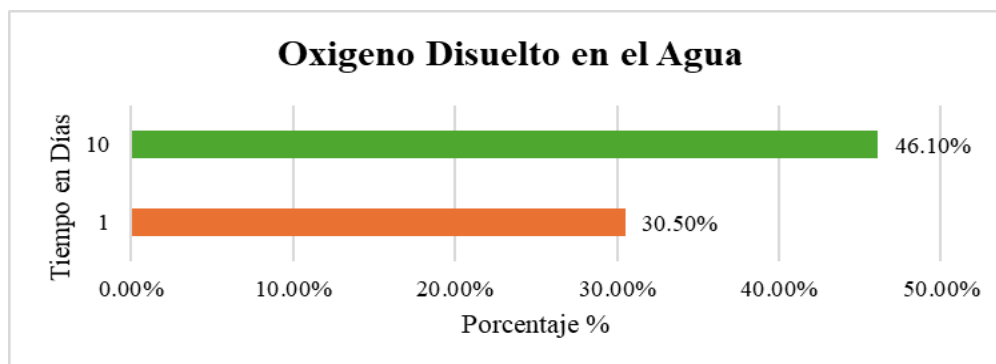
Tabla 8. *Parámetro de Porcentaje de Oxígeno Disuelto antes y después del tratamiento.*

Valor de porcentaje de oxígeno disuelto en el Agua Antes del Tratamiento.	Valor de porcentaje de oxígeno disuelto en el Agua Después del Tratamiento.	Valor Normativo
30.50%	46.1 %	Análisis y reporte

Fuente: Autor y Resolución 0631 de 2015.

En la Tabla 8 se puede evidenciar el aumento del % OD esto se debe a que el sistema integrado por humedal artificial y biorreactor no solo remueve hierro, sino que también realiza una mejora a la oxigenación del medio, lo que es crucial para estimular procesos aeróbicos en el reactor, al igual que mejorar la calidad ecológica del agua y permitir condiciones de vida acuática en cuerpos receptores. Esto probablemente se debe al incremento de pH y la reducción de materia orgánica, por ende este incremento significativo en el oxígeno disuelto determino que el sistema es una alternativa funcional no solo para la remoción de hierro, sino también para la restauración parcial de las condiciones acuáticas del recurso hídrico tratado.

Figura 25. *Porcentaje de Oxígeno Disuelto antes y después del tratamiento.*



Fuente: Autor.

En la Figura 25 se evidencia el incremento del porcentaje de oxígeno disuelto en función del tiempo lo que indica que el sistema de tratamiento presenta un comportamiento beneficioso y a su vez acumulativo con el paso de los días, ya que, en solo 10 días, se logra una mejora muy significativa en la calidad del agua tratada.

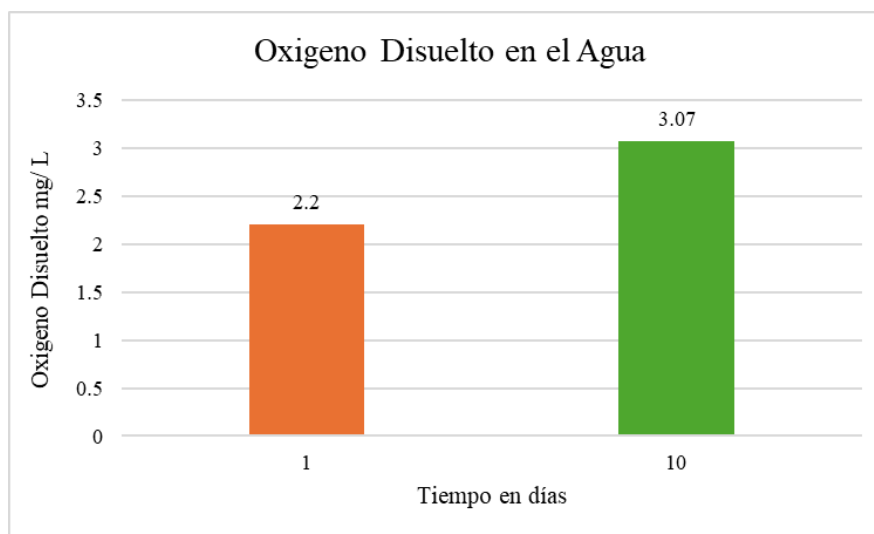
Tabla 9. *Parámetro de Oxígeno Disuelto antes y después del tratamiento.*

Valor de Oxígeno Disuelto en el Agua Antes del Tratamiento.	Valor de Oxígeno Disuelto en el Agua Después del Tratamiento.	Valor Normativo
2.2 Mg/L	3.07 Mg/L	< 4 Mg/L

Fuente: Autor y Resolución 0631 de 2015.

Como se evidencia en Tabla 9 existe una ganancia de oxígeno disuelto la cual puede atribuirse al proceso de oxidación de hierro en el sistema integrado de humedal artificial y biorreactor, a una menor carga de DQO o de compuestos reductores.

Figura 26. *Oxígeno Disuelto antes y después del tratamiento.*



Fuente: Autor.

En esta Figura 26 se identificó un aumento del OD en el agua, donde se pudo determinar que este aumento lo que mejoran la oxigenación del agua y de igual manera favorece la reacción de oxidación que permite la transformación de compuestos contaminantes

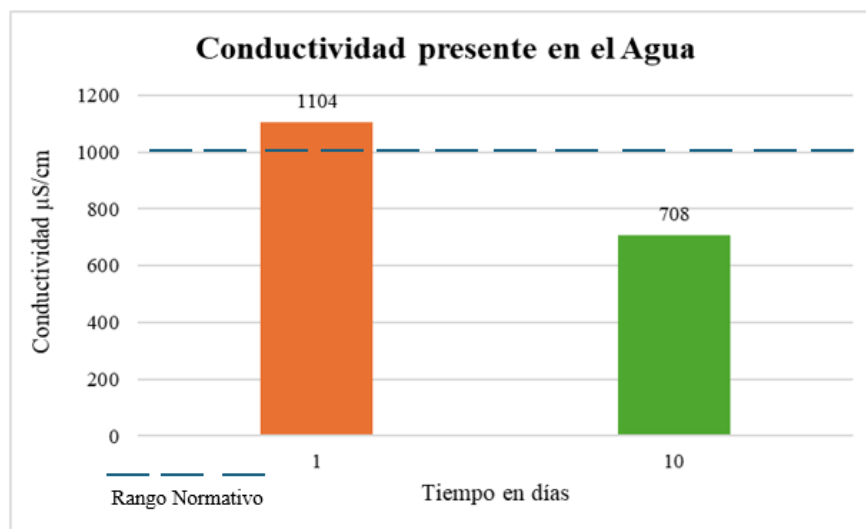
Tabla 10. *Parámetro de conductividad antes y después del tratamiento.*

Valor de conductividad en el Agua Antes del Tratamiento.	Valor de conductividad en el Agua Después del Tratamiento.	Valor Normativo
1104 $\mu\text{S/cm}$	708 $\mu\text{S/cm}$	1000

Fuente: Autor y Resolución 0631 de 2015.

En la Tabla 10 se evidencia una disminución en la conductividad, demostrando así la eficiencia del sistema integrado de humedal artificial y reactor bacteriano, esto se puede deber a la adsorción en el sustrato del humedal y a una precipitación química realizada en el biorreactor, de igual manera una baja conductividad suele correlacionarse con la mejora en el pH el cual logro una neutralidad, a la reducción del metal de hierro y a una mayor oxigenación lo que concuerda con los parámetros previamente establecidos

Figura 27. *conductividad antes y después del tratamiento.*



Fuente: Autores

Por otra parte en la Figura 27 se muestra el valor inicial del día que corresponde a 1104 $\mu\text{S}/\text{cm}$, el cual sugiere un agua con alta carga salina o presencia de contaminantes metálicos en este caso el hierro lo que se considera común en vertimientos mineros, por otra parte tras el tratamiento, el valor baja a 708 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo cual representa una reducción del 35.8 %, esto indica una reducción en el metal hierro, como no se evaluaron otros metales, esta agua los puede presentar.

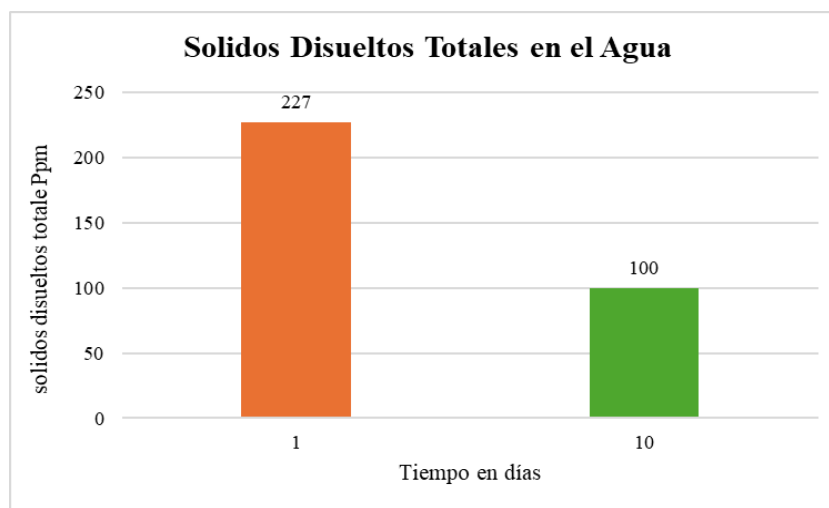
Tabla 11. *Parámetro de Solidos Disueltos Totales antes y después del tratamiento.*

Valor de solidos disueltos totales en el Agua Antes del Tratamiento.	Valor de solidos disueltos totales Agua Después del Tratamiento.	Valor Normativo
227 Ppm	100 Ppm	< 2000 Ppm

Fuente: Autor y Resolución 0631 de 2015.

Como se puede observar en la Tabla 11 el sistema integrado entre humedal artificial y biorreactor es una herramienta esencial para retener compuestos disueltos, debido a que existe una estabilización iónica por el aumento de pH, la mejora en la conductividad y aumento en el oxígeno disuelto.

Figura 28. *Solidos Disueltos Totales antes y después del tratamiento*



Fuente: Autor.

Como se evidencia en la Figura 28 el tratamiento logró una reducción de 127 ppm, lo cual es equivalente a 55.95 % de eficiencia, por ende, se determinó que este resultado sugiere una disminución general de la carga contaminante, y a su vez una mejora de la calidad del agua tratada tanto en términos fisicoquímicos.

Tabla 12. *Parámetro de Temperatura antes y después del tratamiento.*

Valor de temperatura en el Agua Antes del Tratamiento.	Valor de Temperatura en el Agua Después del Tratamiento.	Valor Normativo
17.73 °C	16.91 °C	-

Fuente: Autor y Resolución 0631 de 2015.

Como se puede evidenciar en la Tabla 12 el cambio de temperatura representa una disminución de 0.82 °C, lo que equivalente a un descenso del 4.6 %, es importante recalcar que la temperatura no presenta un valor normativo, sin embargo, es temperaturas son estables y típica de ambientes templados.

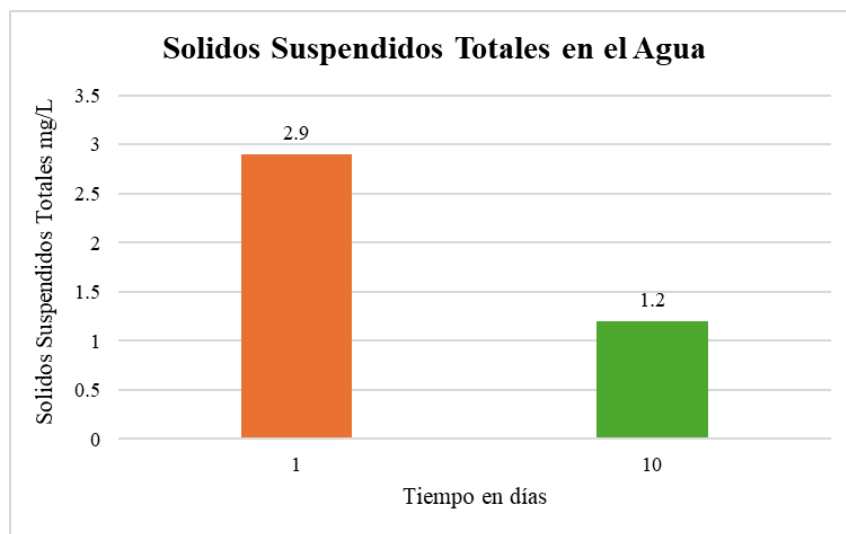
Tabla 13. *Parámetro de Sólidos Suspendidos Totales antes y después del tratamiento.*

Valor de sólidos suspendidos totales en el Agua Antes del Tratamiento.	Valor de sólidos suspendidos totales en el Agua Después del Tratamiento.	Valor Normativo
2.9 Mg/L	1.2 Mg/L	50 Mg/L

Fuente: Autor y Resolución 0631 de 2015.

Se puede evidenciar en la Tabla 13 que el agua presentaba parámetros óptimos, sin embargo, después del proceso de tratamiento se logra evidenciar una mejora, la cual se debe sobre todo al humedal artificial, categorizándola como agua limpia.

Figura 29. *Solidos Suspendidos Totales antes y después del tratamiento*



Fuente: Autor.

En esta Figura 29, se puede evidenciar la reducción de solidos suspendidos totales la cual dé es de 1.7 mg/L, lo que representa una mejora aproximada 58.6 %, lo que índica exitoso el tratamiento.

4.6. ANÁLISIS DE REMOCIÓN DE HIERRO DEL SISTEMA INTEGRADO POR HUMEDAL ARTIFICIAL Y BIORREACTOR.

En esta sección se pueden observas los parámetros de laboratorio analizados posteriormente al tratamiento

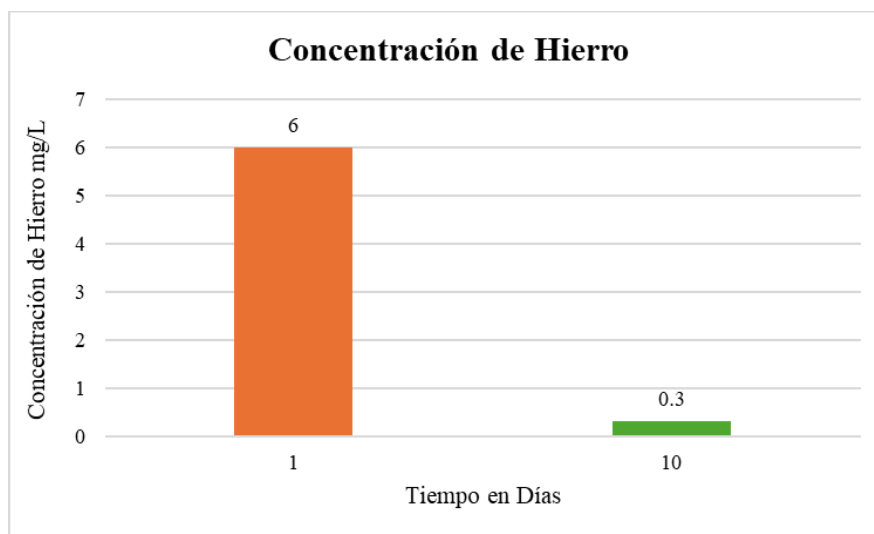
Tabla 14. *Parámetros de hierro.*

Cantidad de Hierro Presente en el Agua Antes del Tratamiento.	Cantidad de Hierro Presente en el Agua Después del Tratamiento.	Valor Normativo
6 Mg/L	0.3 Mg/L	2 Mg/L

Fuente: Autor y Resolución 0631 de 2015.

En la Tabla 14 se observa la cantidad de Hierro presente en el agua antes del tratamiento y después del tratamiento, en esta se puede ver la reducción significativa de hierro y el cumplimiento de la normatividad colombiana lo que es un indicador positivo para la implementación de este sistema de tratamiento integrado entre humedal artificial y biorreactor, este resultado se puede deber a una oxidación y precipitación del hierro en el biorreactor, sin embargo este resultado no se hubiera obtenido sin el humedal artificial, ya que este optimizó las condiciones como el pH para que se permitiera una adecuada reducción de la concentración de este metal pesado.

Figura 30. Concentración del hierro antes y después del tratamiento



Fuente: Autor.

En la Figura 30 se evidencia el éxito del sistema integrado de humedal artificial y biorreactor, ya que su objetivo principal se centraba en la remoción de hierro del agua contaminada por hierro en los vertimientos mineros, ya que como se observa la concentración inicial correspondía a 6 mg/L y fue reducida a 0.3 mg/L, lo que se reconoce como una reducción de hierro de un 95%, lo que son resultados alentadores y visionarios, ya que según esto el sistema de tratamiento si podría implementarse para el tratamiento de los vertimientos mineros.

5. IMPACTO SOCIAL Y HUMANISTICO DEL PROYECTO

La implementación del sistema biotecnológico integrado por humedal artificial y biorreactor para la remediación de los vertimientos mineros contaminados con hierro en el municipio de Samacá, Boyacá, tiene un fuerte impacto social y de carácter humanístico, ya que desde el punto social esta solución mejora directamente la calidad de vida de las comunidades rurales las cuales dependen directamente de las fuentes hídricas afectadas por la actividad minera, puesto que al reducir la contaminación se previenen las enfermedades asociadas al consumo de agua con metales pesados, asegurando así el acceso seguro a un recurso vital.

De igual manera este proyecto tiene un impacto de índole positivo en la economía del municipio, debido a que promueve diversas practicas sostenibles que permiten un equilibrio entre la minería y la protección ambiental, así mismo la implementación de este sistema puede incentivar modelos de negocios y generar empleos que se relacionen con su operación y mantenimiento, fortaleciendo así la conciencia ambiental. Por otra parte desde una perspectiva humanística, esta investigación refleja un compromiso hacia la justicia ambiental y el derecho fundamental al agua limpia.

En virtud de lo anterior se puede afirmar que el sistema integrado entre humedal artificial y biorreactor, no solo ofrece una solución técnica a un problema ambiental, sino que también realiza un cambio cultural en la comunidad, ya que su implementación busca la sostenibilidad, la equidad y la protección de los derechos humanos, demostrando así que la investigación no solo se limita a resultados medibles en laboratorio, sino que de igual manera abre caminos hacia una ciencia con un propósito, que es accesible, inclusiva y profundamente conectada con las necesidades realistas del entorno social y ambiental.

6. CONCLUSIONES

- La caracterización fisicoquímica y microbiológica de las aguas en tres puntos mineros de Samacá reveló drenajes ácidos con pH entre 3.1 y 3.5, concentraciones de hierro de 3 a 6 mg/L y elevados valores de DQO y DBO por encima de los límites normativos, confirmando la necesidad de un modelo de tratamiento biotecnológico.
- La construcción e implementación del prototipo integrado un humedal artificial con lechos de carbón activado, arena, grava y *Eichhornia crassipes*, seguido de un reactor bacteriano con agitación controlada demostró ser técnicamente viable asegurando el flujo hidráulico y la sinergia de los microorganismos
- La evaluación de eficiencia arrojó una remoción de hierro superior al 95 %, una recuperación del pH a valores cercanos a 6,5 y el cumplimiento de los estándares de vertimiento colombianos, validando este sistema combinado como una solución sostenible y replicable para la minería en Boyacá.
- Se determinó que el uso de microorganismos como bacterias y humedales artificiales en un sistema de tratamiento de aguas residuales de vertimientos mineros puede ser una solución a esta problemática actual, ya que según los estudios realizados su constante de velocidad de las bacterias es bastante alta logrando reducir la concentración del hierro en un 90% en tiempo menor a cinco días, sin embargo el aumento del pH es esencial y el cuál consiguió el humedal artificial, es por ello que se considera un sistema eficaz, rentable y sostenible.

7. RECOMENDACIONES

- Aunque es un sistema de tratamiento fiable, se recomienda utilizar el tipo de microorganismos adecuados para el metal que se desee remover, para el caso del hierro se recomienda bacterias ferroxidantes que tiendan a sobrevivir a ambientes arduos y altas temperaturas, esto con la finalidad de mantener su eficiencia y evitar gastos adicionales.
- Se puede implementar como un prototipo a gran escala no obstante garantizar su escalabilidad y resiliencia, es imprescindible continuar investigando sobre la optimización de especies vegetales, los posibles consorcios microbianos, la evaluación de impactos a largo plazo y por ultimo realizar análisis socioeconómicos y de ciclo de vida, ya que a través de una mejora continua y el acompañamiento multidisciplinario se podrá consolidar esta tecnología como una solución eficiente frente a los retos de la minería en el municipio de Samacá, Boyacá.
- No todas las bacterias ferroxidantes actúan igual es por ello por lo que es esencial si se desea implementar el prototipo de biorreactor se tengan en cuenta los parámetros fisicoquímicos del agua esto para asegurar su reproducción y supervivencia en el ambiente en que se desee implementar.

REFERENCIAS

- Alcaldía Municipal de Samacá. (2019). *Plan de desarrollo municipal de Samacá 2016–2019: Samacá con equidad, desarrollo y paz*. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC). <https://repositorio.uptc.edu.co/server/api/core/bitstreams/fe9a480d-335a-4807-af54-1ca3f737251b/content>
- Alfonso, L., Juan, P., & David, L. (2024). *Los males que tienen agonizando a los ríos del norte del Cauca*. <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/los-males-que-tienen-agonizando-a-los-rios-del-norte-del-cauca-3385702>
- Ali, H., Khan, E., & Ilahi, I. (2019). Environmental Chemistry and Ecotoxicology of Hazardous Heavy Metals: Environmental Persistence, Toxicity, and Bioaccumulation. *Journal of Chemistry*, 2019(1), 6730305. <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>
- Álvarez, A. (2022). Aislamiento de microorganismos resistentes a los metales para producción de nanopartículas, provenientes de zonas contaminadas de Guanajuato, México. *Jóvenes En La Ciencia: XXII Verano de La Ciencia UG. Vol. 16* (2022). <http://repositorio.ugto.mx/handle/20.500.12059/7389>
- Amir Nurmamedov. (2025). *The global impact of mining: Challenges and consequences*. <https://www.globalsociety.earth/post/the-global-impact-of-mining-challenges-and-consequences>
- Ana María Peláez. (2011). *En Boyacá, minería de carbón sofoca las aguas*. <https://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/en-boyaca-mineria-de-carbon-sofoca-las-aguas>
- André, P., & Cardona, A. (2018). *HUMEDALES ARTIFICIALES: UNA ALTERNATIVA PARA TRATAMIENTO DE AGUAS DE PRODUCCIÓN*.
- ARAMBURO, M. A., & OLAYA, Y. (2012). PROBLEMÁTICA DE LOS PASIVOS AMBIENTALES MINEROS EN COLOMBIA. *Gestión y Ambiente*, 15(3), 125–133. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/36286>
- Astrid Carolina Herrera Páez Anderson Ruiz García Facultad, A., & Estudios, P. DE. (2017). *Evaluación de un humedal artificial superficial para el tratamiento de aguas residuales generadas en la UFPSO, utilizando las especies JUNCUS EFFUSUS y LEMNA MINOR*. <https://repositorioinstitucional.ufpso.edu.co/xmlui/handle/20.500.14167/4254>
- Aziz, H. A., Othman, N., Yusuff, M. S., Basri, D. R. H., Ashaari, F. A. H., Adlan, M. N., Othman, F., Johari, M., & Perwira, M. (2001). Removal of copper from water using limestone filtration technique: determination of mechanism of removal. *Environment International*, 26(5–6), 395–399. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(01\)00018-6](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(01)00018-6)
- Azpilicueta, C., Pena, L., & Gallego, S. (2010). Los metales y las plantas: entre la nutrición y la toxicidad. *Ciencia Hoy*, ISSN 0327-1218, Vol. 20, Nº. 116 (ABR-MAY), 2010, Págs. 12-16, 20(116), 12–16. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4316172&info=resumen&idioma=SPA>

- Azubuike, C. C., Chikere, C. B., & Okpokwasili, G. C. (2016). Bioremediation techniques—classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 32:11, 32(11), 1–18. <https://doi.org/10.1007/S11274-016-2137-X>
- Barrero, T. H. (2014). *IMPACTO DE LOS DRENAJES ÁCIDOS EN LOS ECOSISTEMAS ACUÁTICOS PRODUCIDOS POR LA MINERÍA DEL CARBÓN EN EL BIERZO: BIOACUMULACIÓN DE METALES PESADOS Y EVOLUCIÓN DE LAS COMUNIDADES BIOLÓGICAS*.
- Bazan, G., & Galizia, G. (2018). Geographical and ecological outline of metal(loid) accumulating plants in Italian vascular flora. *Ecocycles*, 4(1), 47–64. <https://doi.org/10.19040/ecocycles.v4i1.110>
- Bedford, B. L., Rappaport, N. R., & Bernard, J. M. (1988). A life history of *Carex lasiocarpa* Ehrh. ramets. *Aquatic Botany*, 30(1–2), 63–80. [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(88\)90007-1](https://doi.org/10.1016/0304-3770(88)90007-1)
- Bedoya-Betancur, S. A., Arriola-Villaseñor, E., Valencia-Gonzalez, J. D., Ortiz-Muñoz, D. A., Barrera-Zapata, R., Hernández-Maldonado, J. A., Ardila-Arias, A. N., Bedoya-Betancur, S. A., Arriola-Villaseñor, E., Valencia-Gonzalez, J. D., Ortiz-Muñoz, D. A., Barrera-Zapata, R., Hernández-Maldonado, J. A., & Ardila-Arias, A. N. (2023). Adsorción de metales pesados presentes en aguas residuales no domésticas usando residuos agroindustriales de banano. *Revista ION*, 36(2), 15–32. <https://doi.org/10.18273/REVION.V36N2-2023002>
- Blanco, J. A. (2018). Suitability of *Totora* (*Schoenoplectus californicus* (C.A. Mey.) Soják) for Its Use in Constructed Wetlands in Areas Polluted with Heavy Metals. *Sustainability* 2019, Vol. 11, Page 19, 11(1), 19. <https://doi.org/10.3390/SU11010019>
- Bora, A. J., Mohan, R., & Dutta, R. K. (2018). Simultaneous removal of arsenic, iron and manganese from groundwater by oxidation-coagulation-adsorption at optimized pH. *Water Supply*, 18(1), 60–70. <https://doi.org/10.2166/WS.2017.092>
- Bosch, J., Lee, K. Y., Jordan, G., Kim, K. W., & Meckenstock, R. U. (2012). Anaerobic, nitrate-dependent oxidation of pyrite nanoparticles by *thiobacillus denitrificans*. *Environmental Science and Technology*, 46(4), 2095–2101. <https://doi.org/10.1021/ES2022329>,
- Bour, M. El. (2016). Bioremediation. En: Kennish M. Ed. Encycolpedia of estuaries. Encyclopedya of earth science series. Springer. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*, 84–85. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8801-4_359
- Brix, H. (1987). Treatment of Wastewater in the Rhizosphere of Wetland Plants – The Root-Zone Method. *Water Science and Technology*, 19(1–2), 107–118. <https://doi.org/10.2166/WST.1987.0193>
- Bustos Murillo, F. A., Pulido Aponte, Á. E., Rivera Escobar, H. M., Bustos Murillo, F. A., Pulido Aponte, Á. E., & Rivera Escobar, H. M. (2023). Tratamiento de aguas residuales en Colombia y sistemas bioelectroquímicos: usos y perspectivas. *Tecnura*, 27(76), 111–143. <https://doi.org/10.14483/22487638.19390>
- Cámara de Comercio de Tunja. (2023). *Tejido empresarial del municipio de Samacá*. <https://cctunja.org.co/wp-content/uploads/2023/06/Tejido-samaca.pdf>

- Carolina Rosas. (2011). *Diseño preliminar para la implementación del sistema de gestión ambiental para el departamento de producción de C.I Milpa S.A.* <https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/10727>
- Carolina Soto Carrión, & Raquelina Vera Damián. (2023). POTENCIAL DE FITORREMEDIACIÓN DEL MATECLLO (*Hydrocotyle ranunculoides* L.f.) EN AGUAS CONTAMINADAS CON METALES PESADOS DE LA QUEBRADA PACCHANTAY. *Hatun Yachay Wasi*, 3(1), 86–97. <https://doi.org/10.57107/HYW.V3I1.60>
- Chinery, M. (1988). *Libro Guia De Campo De Las Plantas Silvestres De Michael Chinery - Buscalibre*. <https://www.buscalibre.com.co/libro-guia-de-campo-de-las-plantas-silvestres/28037884/p/28037884>
- Corpoboyacá. (2017). *Grave afectación al medio ambiente causó la minería ilegal en Samacá - Corpoboyacá*. <https://www.corpoboyaca.gov.co/noticias/grave-afectacion-al-medio-ambiente-causo-la-mineria-ilegal-en-samaca/>
- Cota-Ruiz, K., Nuñez-Gastelúm, J. A., Delgado-Rios, M., & Martinez-Martinez, A. (2018). BIORREMEDIACIÓN: ACTUALIDAD DE CONCEPTOS Y APLICACIONES. *Biotechnia*, 21(1), 37–44. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v21i1.811>
- Delgadillo, González, Villagómez, & Sandoval. (2011). *Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación*. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000200002
- DONAIRES, A. E., LUME, L. M. A., ARMAS, L. Q., LOVERA, D., GONZALES, J. M. A., LÁZARO, K. A. D., & RIVERA, V. H. (2019). Comparación de la fitorremediación con especies nativas en las aguas drenadas en la bocamina de tangana en el distrito de Huachocolpa – Huancavelica. *Revista de Investigación Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 5(1). <https://doi.org/10.17162/RICTD.V5I1.1355>
- Duque, A. L. (2009). *Remoción de hierro y manganeso en aguas subterráneas mediante doble filtración con flujo a presión. Caso el hormiguero - Cali*.
- Elba Barrios. (2025). *Humedales artificiales: una solución natural para limpiar el agua – Agua.org.mx*. <https://agua.org.mx/editoriales/humedales-artificiales-una-solucion-natural-para-limpiar-el-agua/>
- Esperanza Perez, G., & Jimenez Prieto, Y. (2022). HUMEDALES CONSTRUIDOS BIOACTIVADOS CON MICROORGANISMOS EFICIENTES: UNA VÍA PARA LA GESTIÓN DE RESIDUALES EN EL MATADERO CHICHÍ PADRÓN. *Environmental Technology and Innovation*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100472>
- Flores. (2008). *Convenio interadministrativo No. 07-06-263-048 (000404) Instituto de investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH), Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), Corporación Autónoma Regional de Boyacá (CORPOBOYACÁ), Corporación Autónoma de Chivor (CORPOCHIVOR) Mayo de 2008*. <https://faunacorpochivor.gov.co/wp-content/uploads/2016/04/Estudio-del-estado-actual-del-paramo-de-Rabanal.pdf>

- Gobernación y Secretaría de Salud de Boyacá. (2020). *Análisis de Situación de Salud – ASIS Samacá 2020. Gobierno de Boyacá*.
https://www.boyaca.gov.co/SecSalud/images/Documentos/asis2020/asis_samaca_2020.pdf
- Gómez, M. H., Peña, R., & Escalante, L. (2019). UTILIZACIÓN DE *Hydrocotyleumbellata* EN LA ABSORCIÓN DE ELEMENTOS CONTAMINANTES ESPECÍFICOS EN AGUAS RESIDUALES. *Tecnociencia*, 21(1).
<https://doaj.org/article/d0067f8687ad4025a72b72f964c8dcf3>
- Goswami, R. K., Agrawal, K., Shah, M. P., & Verma, P. (2022). Bioremediation of heavy metals from wastewater: a current perspective on microalgae-based future. *Letters in Applied Microbiology*, 75(4), 701–717. <https://doi.org/10.1111/LAM.13564>
- Govin-Sanjudo, A., de la Caridad Reyes-Palmero, M., Guerra-Quintana, M., & Isabel Sánchez-López, M. (2020). *Caracterización de bacterias resistentes a metales pesados aisladas de un residual minero cubano*.
- Hamdy, S. A., El Hefnawy, H. M., Azzam, S. M., & Aboutabl, E. A. (2018). Chemical profiling, volatile oil analysis and anticholinesterase activity of *Hydrocotyle umbellata* L. aerial parts cultivated in Egypt. *South African Journal of Botany*, 115, 108–112.
<https://doi.org/10.1016/J.SAJB.2018.01.019>
- Hernández-Caricio, C., Ramírez, V., Martínez, J., Quintero-Hernández, V., Baez, A., Munive, J.-A., & Nora, R.-M. (2022). *Los metales pesados en la historia de la humanidad, los efectos de la contaminación por metales pesados y los procesos biotecnológicos para su eliminación: el caso de Bacillus como bioherramienta para la recuperación de suelos*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7091407>
- Hidalgo Castro, P. (2019). *STUDY OF THE PHYSICAL-MECHANICAL BEHAVIOR OF THE TIED CAT-TAIL ROLLS: INFLUENCE OF THE TENSION OF MOORING, DIAMETER AND LENGTH. DAYA*.
<https://revistas.uazuay.edu.ec/index.php/daya/article/view/219/289>
- Hoffmann, H. (2011). *Título original: Technology Review of Constructed Wetlands Subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment*. www.gtz.de/ecosan
- Hýsková, P., Gaff, M., Hidalgo-Cordero, J. F., & Hýsek, Š. (2020). Composite materials from totora (*Schoenoplectus californicus*. C.A. Mey, Sojak): Is it worth it? *Composite Structures*, 232. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2019.111572>
- IDEAM. (2010). *Estudio nacional del agua, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*.
- Jacobo, P. (2024). *Biorremediación en la minería*.
<https://www.javeriana.edu.co/pesquisa/biorremediacion-mineria-de-carbon/>
- Jain, C. K., Malik, D. S., & Yadav, A. K. (2016). Applicability of plant based biosorbents in the removal of heavy metals: a review. *Environmental Processes*, 3(2), 495–523.
<https://doi.org/10.1007/S40710-016-0143-5>
- Jennings, S. R., Neuman, D. R., Blicher, P. S., & Alaska. (2008). *Acid Mine Drainage and Effects on Fish Health and Ecology: A Review*.

- Johandra, R. G.-R., Alex, R. J.-C., Ricardo, J. B.-C., & Rosa, A. C.-M. (2021). *Estudio de los procesos de remoción de hierro y manganeso en aguas subterráneas: una revisión*.
- Kadlec, & Robert, H. (1996). *Treatment wetlands*. <https://archive.org/details/treatmentwetland0000kadl>
- Khatri, N., Tyagi, S., & Rawtani, D. (2017). Recent strategies for the removal of iron from water: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 19, 291–304. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2017.08.015>
- Kodituwakku, K. A. R. K., & Yatawara, M. (2020). Phytoremediation of Industrial Sewage Sludge with *Eichhornia crassipes*, *Salvinia molesta* and *Pistia stratiotes* in Batch Fed Free Water Flow Constructed Wetlands. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 104(5), 627–633. <https://doi.org/10.1007/S00128-020-02805-0>/METRICS
- Komnitsas, K., Bartzas, G., & Paspaliaris, I. (2004). Efficiency of limestone and red mud barriers: laboratory column studies. *Minerals Engineering*, 17(2), 183–194. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2003.11.006>
- Leonardo andres Parrao Lopez. (2018). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS*. <https://1library.co/document/zlnv99lq-diseno-construccion-prototipo-artificial-subsuperficial-tratamiento-residuales-domesticas.html>
- Leonardo Güiza Suárez. (2011). *Perspectiva jurídica de los impactos ambientales sobre los recursos hídricos provocados por la minería en Colombia*. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-25302011000300008
- Li, C., Wang, S., Du, X., Cheng, X., Fu, M., Hou, N., & Li, D. (2016). Immobilization of iron- and manganese-oxidizing bacteria with a biofilm-forming bacterium for the effective removal of iron and manganese from groundwater. *Bioresource Technology*, 220, 76–84. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2016.08.020>
- Lottermoser, B. G. (2007). *Characterization, Treatment, Environmental Impacts*.
- Luis manuel Benedetti Rojas. (2004). *Contaminacion de aguas por actividad minera*. <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/d2797bb1-317c-485e-85bb-07bd859bd857/content>
- María Fernanda Guevara Granja, & Lenin Javier Ramírez Cando. (2015). *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*. 22(2), 5–11. <https://doi.org/10.17163/lgr.n22.2015.01>
- Mettler, S., Wolthers, M., Charlet, L., & Gunten, U. von. (2009). Sorption and catalytic oxidation of Fe(II) at the surface of calcite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(7), 1826–1840. <https://doi.org/10.1016/J.GCA.2009.01.003>
- Milke, J., Gałczyńska, M., & Wróbel, J. (2020). The Importance of Biological and Ecological Properties of *Phragmites Australis* (Cav.) Trin. Ex Steud., in Phytoremediation of Aquatic Ecosystems—The Review. *Water* 2020, Vol. 12, Page 1770, 12(6), 1770. <https://doi.org/10.3390/W12061770>
- Mulkeen, C. J., Williams, C. D., Gormally, M. J., & Healy, M. G. (2017). Seasonal patterns of metals and nutrients in *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steudel in a constructed

- wetland in the west of Ireland. *Ecological Engineering*, 107, 192–197. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2017.07.007>
- Mwandira, W., Nakashima, K., Kawasaki, S., Arabelo, A., Banda, K., Nyambe, I., Chirwa, M., Ito, M., Sato, T., Igarashi, T., Nakata, H., Nakayama, S., & Ishizuka, M. (2020). Biosorption of Pb (II) and Zn (II) from aqueous solution by *Oceanobacillus profundus* isolated from an abandoned mine. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/S41598-020-78187-4>,
- Nava-Rojas, J., Lango-Reynoso, F., Castañeda-Chávez, M. del R., Reyes-Velázquez, C., Nava-Rojas, J., Lango-Reynoso, F., Castañeda-Chávez, M. del R., & Reyes-Velázquez, C. (2023). Remoción de Contaminantes en los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial: Una Revisión. *Terra Latinoamericana*, 41, 1–12. <https://doi.org/10.28940/TERRA.V41I0.1715>
- OIT. (2025). *Organizacion Internacional del Trabajo*. <https://www.ilo.org/>
- Olivia Cañizares-villanueva, R. (2000a). Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana. *Revista Latinoamericana de Microbiología*.
- Olivia Cañizares-villanueva, R. (2000b). Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana. *Revista Latinoamericana de Microbiología*.
- Ontañón, O. M., Fernandez, M., Agostini, E., & González, P. S. (2018). Identification of the main mechanisms involved in the tolerance and bioremediation of Cr(VI) by *Bacillus* sp. SFC 500-1E. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(16), 16111–16120. <https://doi.org/10.1007/S11356-018-1764-1>,
- Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., & Gallo, J. A. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9–18. <https://doi.org/10.31908/19098367.0001>
- Pacheco Peña, L. A. (2021). *Capacidad de Adsorción de plomo (II) mediante el uso de totora (Scirpus californicus), en las aguas contaminadas*. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/7726>
- Pardo, & Gonzales. (2011). *Aguas en Boyacá contaminadas por residuos de minas de carbón*. <https://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/aguas-en-boyaca-contaminadas-por-residuos-de-minas-de-carbon>
- PNUMA. (2025). *Acerca del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente | UNEP - UN Environment Programme*. <https://www.unep.org/es/who-we-are/about-us>
- Pozo-Antonio, J. S., Puente, I., Lagüela, S., Veiga, M., Pozo-Antonio, J. S., Puente, I., Lagüela, S., & Veiga, M. (2017). Tratamiento microbiano de aguas ácidas resultantes de la actividad minera: una revisión. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 8(3), 75–91. <https://doi.org/10.24850/J-TYCA-2017-03-05>
- Puerta, N. H., Sebastián, J., Galvis, L., Puerta, H., & Luna, &. (2016). *Prueba piloto para la evaluación de la eficiencia de las plantas fitorremediadoras del humedal Las Tinguas, en el tratamiento de aguas residuales domésticas*. Universidad de La Salle. Facultad de Ingeniería. Ingeniería Ambiental y Sanitaria. <https://hdl.handle.net/20.500.14625/20849>

- Riggio, V. A., Ruffino, B., Campo, G., Comino, E., Comoglio, C., & Zanetti, M. (2018). Constructed wetlands for the reuse of industrial wastewater: A case-study. *Journal of Cleaner Production*, 171, 723–732. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.10.081>
- Rivera, Camejo, Moya, Mendez, & Bravo. (2011). *ESTUDIO DE BIOLIXIVIACIÓN DE UN MINERAL DE SULFUROS DE COBRE DE BAJA LEY CON BACTERIAS Tio- Y Ferro-oxidantes EN CONDICIONES TERMÓFILAS*. <https://revistaingenieria.uda.cl/Publicaciones/260009.pdf>
- Rodríguez Aparicio, J., & Vergara Buitrago, P. A. (2021). Análisis ambiental de la minería de carbón en el ecosistema estratégico de páramo (Boyacá, Colombia). *Scientia et Technica*, ISSN 0122-1701, Vol. 26, Nº. 3, 2021 (Ejemplar Dedicado a: Julio-Septiembre 2021), Págs. 398-405, 26(3), 398–405. <https://doi.org/10.22517/23447214.24519>
- Ruiz Tarrillo, C., & Vargas Castañeda, A. J. (2024a). Remoción de metales (As, Cd, Fe, Mn) mediante un humedal artificial flotante con *Eichhornia crassipes* y *Scirpus californicus* en aguas superficiales de la quebrada El Sinchao, Hualgayoc, Cajamarca, 2023. *Universidad Privada Del Norte*. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/38328>
- Ruiz Tarrillo, C., & Vargas Castañeda, A. J. (2024b). Remoción de metales (As, Cd, Fe, Mn) mediante un humedal artificial flotante con *Eichhornia crassipes* y *Scirpus californicus* en aguas superficiales de la quebrada El Sinchao, Hualgayoc, Cajamarca, 2023. *Universidad Privada Del Norte*. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/38328>
- Sanz, N. (2018). *Investigador UBB obtiene patente por innovador dispositivo que aumenta eficacia de los humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales rurales – VRIP*. <https://vrip.ubiobio.cl/inicio/noticias/investigador-ubb-obtiene-patente-por-innovador-dispositivo-que-aumenta-eficacia-de-los-humedales-artificiales-para-el-tratamiento-de-aguas-residuales-rurales/>
- Sarango, P. J. D., & Andrade, C. X. Z. (2023). Efficiency Analysis of a Vertical Flow Subsurface Wetland Experiment Plant for Wastewater Treatment. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research (BJAER)*, 6(6), 1–11. <https://doi.org/10.34188/BJAERV6N2-054>
- Secretaría de Salud de Boyacá. (2017). *Perfil municipal de salud: Samacá. Gobierno de Boyacá*.
- Sharma, A., Kapoor, D., Wang, J., Shahzad, B., Kumar, V., Bali, A. S., Jasrotia, S., Zheng, B., Yuan, H., & Yan, D. (2020). Chromium Bioaccumulation and Its Impacts on Plants: An Overview. *Plants*, 9(1), 100. <https://doi.org/10.3390/PLANTS9010100>
- Shkolnikov, V., Bahga, S. S., & Santiago, J. G. (2012). Desalination and hydrogen, chlorine, and sodium hydroxide production via electrophoretic ion exchange and precipitation. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 14(32), 11534–11545. <https://doi.org/10.1039/C2CP42121F>
- Shukla, S. K., Khan, A., & Rao, T. S. (2021). Microbial fouling in water treatment plants. *Microbial and Natural Macromolecules: Synthesis and Applications*, 589–622. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820084-1.00023-5>
- Silva Barrera. (2019). *Uso de la biorremediación en suelos degradados por la minería de carbón*. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/3742266?show=full>

- Sun-Kou, M. del R., Obregón-Valencia, D., Pinedo-Flores, Á., Paredes-Doig, A. L., & Aylas-Orejón, J. (2014). Adsorción de metales pesados empleando carbones activados preparados a partir de semillas de aguaje. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 80(4), 225–236. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2014000400002&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Tejada, Villabona, & Garcés. (2015). *Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico*. http://scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-77992015000100010
- Tekere, M., & Tekere, M. (2019). Microbial Bioremediation and Different Bioreactors Designs Applied. *Biotechnology and Bioengineering*. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.83661>
- Totoy Quinga, C. A. (2022). *Evaluación de la eficiencia de remoción de DQO de un humedal artificial para el tratamiento secundario de los lixiviados del relleno sanitario Romerillos, cantón Mejía*. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/23563>
- UnADM. (2025a). *Ingeniería de biorreactores I*. <http://www.eiq.cl/noticia.php?idd=432>
- UnADM. (2025b). *Ingeniería de biorreactores I*. <http://www.eiq.cl/noticia.php?idd=432>
- Vásquez, Y., Escobar, M. C., Vásquez, Y., & Escobar, M. C. (2020). Reactores Bioquímicos Pasivos: Una alternativa biotecnológica para la remediación de drenajes ácidos de mina. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 22(2), 53–69. <https://doi.org/10.15446/REV.COLOMB.BIOTE.V22N2.74090>
- Vera, M., Schippers, A., & Sand, W. (2013). Progress in bioleaching: Fundamentals and mechanisms of bacterial metal sulfide oxidation-part A. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97(17), 7529–7541. <https://doi.org/10.1007/S00253-013-4954-2>,
- Vigneswaran, S., & Visvanathan, C. (1995). *Water Treatment Processes: Simple Options*. CRC Press. .
- Vílchez Vargas, R. (2005). *Eliminación de metales pesados de aguas subterráneas mediante sistemas de lechos sumergidos: estudio microbiológico de las biopelículas*. <https://digibug.ugr.es/handle/10481/615>
- Vymaza, J. (2022). The Historical Development of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Land* 2022, Vol. 11, Page 174, 11(2), 174. <https://doi.org/10.3390/LAND11020174>
- Vymazal, J., & Březinová, T. (2016). Accumulation of heavy metals in aboveground biomass of *Phragmites australis* in horizontal flow constructed wetlands for wastewater treatment: A review. *Chemical Engineering Journal*, 290, 232–242. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2015.12.108>
- Wang, S. J., & Zhong, J. J. (2007). Bioreactor Engineering. *Bioprocessing for Value-Added Products from Renewable Resources*, 131–161. <https://doi.org/10.1016/B978-044452114-9/50007-4>
- YaliTech. (2025). *EL IMPACTO DEL HIERRO Y MANGANESO EN EL AGUA POTABLE; MEDICIÓN DISCRETA Y EN TIEMPO REAL*. <https://yalitech.cl/blog/el-impacto-del-hierro-y-manganeso-en-el-agua-potable-medicion-discreta-y-en-tiempo-real>

- Yin, S., Wang, L., Kabwe, E., Chen, X., Yan, R., An, K., Zhang, L., & Wu, A. (2018). Copper Bioleaching in China: Review and Prospect. *Minerals 2018*, Vol. 8, Page 32, 8(2), 32. <https://doi.org/10.3390/MIN8020032>
- ZENG, T. tao, ZHANG, X. ling, NONG, H. du, HU, Q., WANG, L. qin, & WANG, A. jie. (2022). Efficiency, mechanism and microbial community of Cd(II) removal by mixed bacteria enriched from heavy metals mine soil. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 32(10), 3404–3419. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(22\)66028-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(22)66028-X)
- Zevi, Y., Dewita, S., Aghasa, A., & Dwinandha, D. (2018). Removal of Iron and Manganese from Natural Groundwater by Continuous Reactor Using Activated and Natural Mordenite Mineral Adsorption. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 111(1), 012016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/111/1/012016>
- Zhao, J., Li, F., Cao, Y., Zhang, X., Chen, T., Song, H., & Wang, Z. (2021). Microbial extracellular electron transfer and strategies for engineering electroactive microorganisms. *Biotechnology Advances*, 53, 107682. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2020.107682>
- Zou, Y. C., Yu, X. F., Lu, X. G., & Jiang, M. (2012). Vertical migration and distribution of added dissolved iron in *Carex lasiocarpa* marsh soil. *Ecological Engineering*, 44, 36–43. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2012.04.004>

ANEXOS

A continuación, se presentan los certificados internacionales de ponencias y congresos realizados por el autor los cuales generaron un gran aporte para esta investigación en especial en el estudio microbiológico del biorreactor.

Anexo 1. Ponencia Internacional, XVII Congreso de Estudiantes de Ingeniería, Cancún México año 2023, titulado: EXTRACCIÓN DEL HIERRO A PARTIR DE HEMATITA MEDIANTE EL USO DE BACTERIAS.



Fuente: Autor.

Anexo 2. Ponencia Internacional 3er Congreso Internacional de Objetivos de Desarrollo Sostenible del año 2024, titulado: Tendencias de la investigación sobre la biorremediación de metales pesados en aguas residuales utilizando microorganismos.



Fuente: Autor.

**Anexo 3. Ponencia Internacional y Evidencia Memorias del 2do Congreso Internacional
Objetivos de Desarrollo Sostenible año 2022, titulado: Extracción del Hierro a partir de
Hematita Mediante el Uso de Bacterias.**



Fuente: Autor.

Link de apoyo redirecciona a las memorias:

https://www.tdea.edu.co/images/tdea/galeria/2023_g/MemoriasTdeAodscongreso.pdf

Anexo 4. Ponencia Internacional 1er Encuentro Internacional de Proyectos de Ingeniería y Procesos Sostenibles año 2025, titulado: Tratamiento Biotecnológico de Aguas Mineras Contaminadas con Hierro en Samacá, Boyacá.



Fuente: Autor.

Anexo 5. Ponencia Internacional Congreso Internacional de Departamentos Académicos Resolución 4.0 y Crisis ecológica: Retos para la educación del Siglo XXI, 2021.



Fuente: Autor.

Anexo 6. Ponencia Encuentro Ingenio Ambiental- Exposición de Poster de Investigación, 2021.



Fuente: Autor.

Por último, como aportes a la investigación se muestra el Reconocimiento San Alberto Magno como Estudiante Líder en Investigación.

Anexo 7. Reconocimiento San Alberto Magno como Estudiante Líder en Investigación.



Fuente: Autor.