UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE TEXTILES

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA TEXTIL

TEMA:

"Efectividad del sulfato de aluminio a diferente pH en la eliminación del color de las aguas residuales de tintura de fibras proteínicas"

AUTOR: Cuasquer Guerrero Fernanda Abigail

DIRECTOR: MSc. Esparza Encalada Darwin José

Ibarra – Ecuador

2026

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA

AUTORIZACIÓN DE USO DE PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Cuasquer Guerrero Fernanda Abigail

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	"EFECTIVIDAD DEL SULFATO DE ALUMINIO A DIFERENTE PH EN LA ELIMINACIÓN DEL COLOR DE LAS AGUAS RESIDUALES DE TINTURA DE FIBRAS PROTEÍNICAS"
AUTOR:	Cuasquer Guerrero Fernanda Abigail
FECHA:	1 de julio del 2026

SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO		
PROGRAMA:	Pregrado ■	Posgrado ☐
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniera Textil	
DIRECTOR:	MSc. Esparza Encalada Darwin José	

2. CONSTANCIA

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se desarrolló, sin violar derechos de autores de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es titular de los derechos patrimoniales, por lo que se asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por terceros.

Ibarra, a los 1 días del mes de julio del 2026.

Autor (a).



Firma: ……..…

Nombre: Cuasquer Guerrero Fernanda Abigail

C.I. 0401979760

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, a los 1 días del mes de julio del 2026

MSc. Esparza Encalada Darwin José

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
DARWIN JOSE ESPARZA ENCALADA

(f): _____

MSc. Esparza Encalada Darwin José

C.C.: 1001584570

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificador del Trabajo de Integración Curricular **"EFECTIVIDAD DEL SULFATO DE ALUMINIO A DIFERENTE PH EN LA ELIMINACIÓN DEL COLOR DE LAS AGUAS RESIDUALES DE TINTURA DE FIBRAS PROTEÍNICAS",** elaborado por Cuasquer Guerrero Fernanda Abigail, previo a la obtención de título de INGENIERA TEXTIL, aprueba el siguiente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
DARWIN JOSE ESPARZA ENCALADA

(f): ----------

MSc. Esparza Encalada Darwin José

C.C.: 1001584570

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
OMAR VINICIO GODOY COLLAGUAZO

(f): ----------

MSc. Godoy Collaguazo Omar Vinicio

C.C.: 1003083936

DEDICATORIA

A mis amados padres, Alonso Cuasquer y María Guerrero, por estar siempre presentes. En los momentos buenos y malos durante esta etapa en mi vida. Ustedes me enseñaron que rendirse no era una opción y que los sueños se alcanzan trabajando en ellos, paso a paso. Este título es tanto mío como de ustedes, porque sin su apoyo y su confianza esto no habría sido posible.

A la memoria de mi abuelita Delfina Martínez. Su amor me sigue abrazando y me recuerda por qué vale la pena seguir adelante.

Fernanda Cuasquer

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradezco a Dios y a San Lorenzo. Por sostenerme cuando quise rendirme y por darme la fuerza en cada semestre que parecía complicado. Por brindarme la sabiduría necesaria para continuar este camino, al estar lejos de casa.

A mi hermana Daniela Cuasquer, quien, a pesar de la distancia, siempre estuvo presente. Gracias por escucharme y motivarme a seguir adelante.

Agradezco al MSc. Darwin Esparza por su acompañamiento constante, su paciencia y el compromiso demostrado en cada orientación brindada. Sus conocimientos fueron un pilar importante en la culminación de este proyecto.

También agradezco al MSc. Omar Godoy, por su guía y disposición durante el tiempo que formó parte de este proceso. Su aporte académico fue significativo en el desarrollo de este trabajo.

Fernanda Cuasquer

RESUMEN

La tintura de fibras proteínicas, como la lana, genera aguas residuales con alta carga de colorantes ácidos que permanecen disueltos en el efluente. La contaminación presente del agua residual es un limitante. Porque no se puede realizar una descarga segura. Por esta razón obliga a implementar tratamientos que reduzcan el impacto ambiental y faciliten el cumplimiento de las normativas ambientales. Por lo tanto, el presente trabajo evaluó la efectividad del sulfato de aluminio a diferente pH en la eliminación del color de las aguas residuales de tintura de fibras proteínicas. Se inicio recolectando las muestras en la empresa "IMBATEX". Para la recolección de las probetas se hizo siguiendo las normas NTE INEN 2176:1998 y NTE INEN 2169:2013, para asegurar la representatividad y trazabilidad. A escala de laboratorio fueron preparados 12 tratamientos. Se combinaron tres niveles de pH (5, 6 y 7) y cuatro dosificaciones (50, 100, 200 y 400 mg/L) de ($Al_2(SO_4)_3$). En cada ensayo, primero se ajustó el pH. Luego se dosifico el agente coagulante y se aplicó agitación controlada. El periodo de sedimentación fue de 24 horas para cada muestra. La efectividad del tratamiento se determinó por espectrofotometría bajo el estándar CIELAB DE65/10°. Como indicador se usó $\Delta Ecmc$, que compara el color de la muestra tratada contra la muestra sin tratar (M_0). Los resultados evidenciaron que la efectividad del sulfato de aluminio depende de la interacción entre la dosificación y el pH. Con un pH 5 los cambios fueron moderados, mientras que en un pH 7 se observó una remoción uniforme, pero con promedios de eficacia menores. En comparación con un pH 6 se obtuvo los mejores rendimientos, destacando la dosis de 400 mg/L con un $\Delta Ecmc$ de 3.03 y la de 200 mg/L con un valor de 2.83, siendo estas las condiciones de mayor remoción visual del color. Aunque el análisis estadístico no reportó diferencias significativas ($p = 0.1229$). Se observó que el pH 6 genera una mayor remoción. Por otro lado, a un pH 7 ofrece estabilidad operativa. En conclusión, la optimización del proceso se logra trabajando en un pH 6 dentro del rango 200–400 mg/L. Como condición base fue priorizada la dosis de 200 mg/L por su mayor eficiencia de insumo. La dosis de 400 mg/L debe ser reservada cuando se requiera maximizar la remoción.

Palabras clave: Sulfato de aluminio, aguas residuales, fibras proteínicas, pH, lana.

ABSTRACT

Dyeing protein-based fibers, such as wool, generates wastewater with a high concentration of acid dyes that remain dissolved in the effluent. The contamination present in the wastewater is a limiting factor, as it prevents safe discharge. For this reason, it is necessary to implement treatment processes that reduce environmental impact and facilitate compliance with environmental regulations. Therefore, this study evaluated the effectiveness of aluminum sulfate at different pH levels in removing color from wastewater generated by the dyeing of protein fibers. The study began with sample collection at the company "IMBATEX." Samples were collected in accordance with standards NTE INEN 2176:1998 and NTE INEN 2169:2013 to ensure representativeness and traceability. Twelve treatments were prepared on a laboratory scale. Three pH levels (5, 6, and 7) were combined with four dosages (50, 100, 200, and 400 mg/L) of $Al_2(SO_4)_3$. In each test, the pH was first adjusted. The coagulant was then dosed, and controlled agitation was applied. The sedimentation period was 24 hours for each sample. Treatment effectiveness was determined by spectrophotometry using the CIELAB DE65/10° standard. ΔEcmc was used as an indicator, comparing the color of the treated sample to that of the untreated sample (M0). The results showed that the effectiveness of aluminum sulfate depends on the interaction between dosage and pH. At pH 5, the changes were moderate, while at pH 7, uniform removal was observed, but with lower average efficacy values. Compared to a pH of 6, the best results were obtained, notably with a dosage of 400 mg/L yielding a ΔEcmc of 3.03 and a dosage of 200 mg/L yielding a value of 2.83; these were the conditions that produced the greatest visual color removal. However, the statistical analysis did not report significant differences ($p = 0.1229$). It was observed that a pH of 6 results in greater removal. On the other hand, a pH of 7 provides operational stability. In conclusion, process optimization is achieved by operating at a pH of 6 within the range of 200–400 mg/L. The 200 mg/L dose was prioritized as the baseline condition due to its greater input efficiency. The 400 mg/L dose should be reserved for situations where maximum removal is required.

Keywords: Aluminum sulfate, wastewater, protein fibers, pH, wool.

LISTA DE SIGLAS

UTN: Universidad Técnica del Norte.

DQI S. A.: Distribuidora de Químicos Industriales S. A.

$Al_2(SO_4)_3$: Sulfato de aluminio

L: Luminosidad

a: Eje cromático CIELAB $(-a: verde;\ +a: rojo)$

b: Eje cromático CIELAB $(-b: azul;\ +b: amarillo)$

C: Croma

VD: Variable dependiente

VI: Variable independiente

pH: Potencial hidrogeno

nm: Nanómetros

M0: Muestra base (sin tratamiento)

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I **1**

INTRODUCCIÓN **1**

1.1 Problema de investigación **1**

1.2 Objetivos **2**

1.3 Alcance **2**

1.4 Justificación **4**

1.5 Características del sitio del proyecto **5**

CAPÍTULO II **7**

ESTADO DEL ARTE **7**

2.1 Estudios previos **7**

2.1.1 Impacto ambiental de los colorantes 7

2.1.2 Aguas residuales de la industria textil 7

2.1.3 Coagulación–floculación con sulfato de aluminio 8

2.1.4 Colorante en aguas residuales 9

2.2 Marco legal **10**

2.2.1 Constitución de la República del Ecuador 10

2.2.2 Líneas de investigación de la Universidad Técnica del Norte 10

2.3 Marco conceptual **11**

2.3.1 Fibras textiles 11

2.3.2 Colorantes ácidos 13

2.3.3 Aguas residuales de la industria textil 13

2.3.4 Métodos de remoción del color 14

2.3.5 Coagulación–floculación 15

2.3.6 Sulfato de aluminio 16

CAPÍTULO III 17

METODOLOGÍA 17

3.1 Enfoque de la investigación 17

3.2 Tipos de investigación 17

3.2.1 Investigación Experimental 17

3.2.2 Investigación Analítica 18

3.3 Flujogramas 18

3.3.1 Flujograma del proceso general 18

3.3.2 Flujograma del proceso muestral 19

3.4 Materiales y equipos 20

3.4.1 Espectrofotómetro Color I5 X-Rite 20

3.4.2 Balanza analítica 21

3.4.3 Agitador digital magnético 22

3.4.4 Sulfato de aluminio 24

3.4.5 Elementos para el proceso de laboratorio 24

3.5 Normas de referencia 25

3.5.1 NTE INEN 2176:1998 25

3.5.2 NTE INEN 2169:2013 26

3.5.3 CIELAB D65/10° 26

3.6 Procedimiento 27

3.6.1 Obtención de la muestra 27

3.6.2 Formulación y dosificación de la receta 28

3.6.3 Proceso de coagulación–floculación 28

3.7 Pruebas de laboratorio 29

3.7.1 Prueba de transmitancia en espectrofotómetro 29

CAPÍTULO IV 31

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS 31

4.1 Resultados 31

4.1.1 Resultados del cambio de color 31

4.2 Análisis de confiabilidad 32

4.2.1 Normalidad de los datos 32

4.2.2 Análisis de prueba no paramétrica 33

4.3 Discusión de resultados 34

4.3.1 Análisis de resultados de remoción del color 34

CAPÍTULO V 41

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 41

5.1 Conclusiones 41

5.2 Recomendaciones 42

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 44

7. ANEXOS 50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Líneas de investigación de la Universidad Técnica del Norte 11

Tabla 2 Especificaciones técnicas del Color i5 X–Rite 21

Tabla 3 Especificaciones técnicas del agitador magnético 23

Tabla 4 Datos técnicos del sulfato de aluminio 24

Tabla 5 Elementos de laboratorio 25

Tabla 6 Resultados del cambio de color de las aguas residuales 31

Tabla 7 Prueba no paramétrica del cambio de color 34

Tabla 8 Comparación de ΔEcmc por dosificación 35

Tabla 9 Comparación de ΔEcmc por pH 37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación del laboratorio CTEX 5

Figura 2 Ubicación de la empresa "IMBATEX" 6

Figura 3 Flujograma general 18

Figura 4 Flujograma muestral 19

Figura 5 Color I5 X–Rite 20

Figura 6 Balanza analítica 22

Figura 7 Agitador digital magnético 23

Figura 8 Obtención del agua residual 27

Figura 9 Preparación de las muestras 28

Figura 10 Proceso de agitación 29

Figura 11 Prueba de transmitancia 30

Figura 12 Normalidad de datos 33

Figura 13 Comparación de ΔEcmc por dosificación 36

Figura 14 Comparación de ΔEcmc por pH 37

Figura 15 Gráfico de barras ΔEcmc por pH y dosificación 38

Figura 16 Comparación entre dosificaciones 39

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Ficha técnica del $Al_2 (SO_4)_3$ 50

Anexo 2 Acid RB 51

Anexo 3 Álcali 52

Anexo 4 Recolección de la muestra del agua residual 53

Anexo 5 Tratamiento del agua residual 54

Anexo 6 Espectrofotometría 55

Anexo 7 Resultados de espectrofotometría 56

Anexo 8 Pruebas repetidas 57

Anexo 9 Certificado de uso de laboratório 58

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Problema de investigación

Dentro de la industria textil, específicamente en los procesos de tintura de fibras proteínicas como la lana, alpaca, entre otros, se generan aguas residuales con altas concentraciones de colorantes. Estas aguas residuales presentan un aumento de color, debido a los compuestos orgánicos de los colorantes sintéticos, como son los colorantes ácidos (Vilaseca et al., 2015). La liberación de estos residuos sin un tratamiento adecuado representa un problema para el medio ambiente, ya que incumple normativas ambientales y genera un impacto negativo en los ecosistemas acuáticos (Mercè y Vallvé, 2015).

Debido a esto, las empresas enfrentan multas y restricciones por incumplir regulaciones ambientales, debido a la ineficiencia de los tratamientos de aguas residuales de procesos específicos de tinturas, como en este caso de tintura con fibras proteínicas.

Para la eliminación del color de las aguas residuales, existen diversos métodos, los cuales pueden ser procesos biológicos, fisicoquímicos, entre otros. Como menciona Orellana (2020), los resultados de la efectividad de cada método varían dependiendo de las condiciones del agua y la composición de los contaminantes. Cabe destacar que el sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4))_3$ es una alternativa para la realización del proceso de coagulación–floculación del colorante, ya que los colorantes ácidos presentan una alta solubilidad y así dificulta la remoción de este.

El propósito de esta investigación es determinar las condiciones óptimas del sulfato de aluminio como coagulante-floculante en el tratamiento del agua residual de tintura de fibras proteínicas, evaluando la efectividad a diferentes pH y diferentes dosificaciones del agente coagulante para optimizar la remoción de color. Teniendo en cuenta esa información, se pretende proporcionar bases técnicas para la optimización de los procesos de tratamientos de aguas residuales dentro de las empresas textiles, para lograr alinearse a las demandas ambientales a las cuales están regidas las empresas para poder trabajar.

1.2 Objetivos

Objetivo general

- Evaluar la efectividad del sulfato de aluminio a diferente pH en la eliminación del color de las aguas residuales de tintura de fibras proteínicas en el proceso de coagulación–floculación.

Objetivos específicos

- Recopilar información técnica sobre el tratamiento de aguas residuales y el proceso de coagulación-floculación.
- Obtener y preparar la muestra del agua residual proveniente de la tintura de lana, mediante la aplicación de la norma NTE INEN 2176:1998 y NTE INEN 2169:2013.
- Caracterizar fisicoquímicamente las muestras de agua residual mediante el análisis del pH y la concentración del color, para evaluar la eficiencia del proceso de coagulación-floculación.
- Evaluar y determinar las condiciones óptimas de dosificación del sulfato de aluminio y pH para la remoción del color, mediante el análisis comparativo de datos obtenidos por espectrofotometría, con el fin de optimizar el tratamiento de aguas residuales de tintura de fibras proteínicas.

1.3 Alcance

En la presente investigación se ha realizado una búsqueda exhaustiva de información acerca del proceso de tratamiento de aguas residuales y coagulación-floculación para tener bases teóricas.

Es importante mencionar que en esta investigación se ha evaluado la efectividad del sulfato de aluminio en la remoción del color de aguas residuales provenientes del proceso de tintura de lana de la empresa “IMBATEX”. La investigación se ha enfocado en analizar cómo varía la eficiencia del tratamiento de las aguas residuales al modificar el pH en un rango de 5, 6, 7 y las

dosis del coagulante 50, 100, 200 y 400 mg/L, permitiendo determinar las condiciones óptimas para el efluente de tinturas proteínicas.

Para garantizar la representatividad de los resultados, las muestras recolectadas han seguido los protocolos establecidos en las normas técnicas NTE INEN 2176:1998, utilizada como técnica de muestreo, y la norma NTE INEN 2169:2013, la cual es para el manejo y conservación de la muestra obtenida (NTE INEN 2169, 2013) (NTE INEN 2 176, 1998). Con este procedimiento tiende a asegurar que las características del agua residual evaluada en el laboratorio correspondan a las condiciones reales de los efluentes generados de empresas que tinturan fibras proteínicas.

El estudio fue realizado a escala de laboratorio; para medir el color y el pH se ha usado instrumentación estandarizada y espectrofotómetro. Esta investigación se ha limitado a evaluar la efectividad del sulfato de aluminio, sin considerar otros coagulantes o procesos alternativos. Tampoco ha incluido análisis de otros parámetros de calidad del agua más allá del color y pH, para así mantener un enfoque preciso. Esta investigación es un estudio experimental, el que ha evaluado la efectividad del sulfato de aluminio en diferentes pH en la eliminación del color de las aguas residuales de tinturas de fibras proteínicas.

La muestra se ha recolectado en la empresa “IMBATEX” y aplicando las normas NTE INEN 2176:1998 y NTE INEN 2169:2013. Esa muestra obtenida se ha caracterizado en el espectrofotómetro mediante el método de transmitancia, preparando muestras, con niveles del pH (5, 6, 7) y cuatro dosis de coagulante (50, 100, 200, 400 mg/L), generando un total de 12 muestras, las cuales fueron sometidas al proceso de coagulación-floculación.

El proceso de coagulación–floculación se ha realizado en la máquina de agitación magnética, configurada a 100 rpm durante 3 minutos. Un tiempo de reposo de 24 horas para la sedimentación completa de los flóculos formados. Se han caracterizado las muestras en el espectrofotómetro para realizar la medición del color mediante espectrofotometría por medio del método de transmitancia bajo la norma CIELAB D65/10°, evaluando los resultados obtenidos con los valores de muestra inicial.

Los datos obtenidos se analizaron y establecieron las condiciones óptimas del pH y las dosificaciones del sulfato de aluminio para la remoción del color en las aguas residuales de las fibras proteínicas.

1.4 Justificación

La industria textil genera un gran impacto ambiental; eso se debe a que genera gran cantidad de efluentes de aguas residuales con una alta carga de contaminantes, especialmente en los procesos de tintura. Un ejemplo de ello es la tintura de fibras proteínicas, como la lana, alpaca, seda, entre otros. Estos efluentes tienen presentes colorantes, los cuales pueden ser difíciles de degradar, representando así un gran desafío en el tratamiento de los efluentes.

Por ello, en la presente investigación se ha evaluado la efectividad del sulfato de aluminio a diferentes niveles del pH en la eliminación del color de estas aguas residuales, con el fin de proporcionar información técnica que optimice el proceso de coagulación-floculación. Generando así conocimientos técnicos aplicables sobre el sulfato de aluminio en los procesos de tintura de fibras proteínicas, y así maximizar la eliminación de los residuos del colorante ácido.

Los emprendimientos y las microempresas las cuales se dedican al teñido de fibras proteínicas se beneficiarán directamente de esta investigación y podrán implementar un tratamiento más eficiente y económicamente accesible para la remoción del color de los efluentes de tintura, facilitando así el cumplimiento de la normativa ambiental. Cabe señalar que en muchos casos los sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales requieren altos costos para su implementación e infraestructura, lo que dificulta su implementación, especialmente en los inicios de los emprendimientos artesanales de tinturado de lana y otras fibras proteínicas, los cuales no disponen de recursos para invertir en plantas de tratamientos complejas.

En consecuencia, el $Al_2(SO_4)_3$ se plantea como una opción accesible y a la vez de bajo costo para la eliminación del color del efluente generado por la tintura de fibras proteínicas, permitiendo que los emprendimientos puedan continuar sin inconvenientes, ya que cumplirán las normativas ambientales. Consecuentemente, esta investigación contribuirá al entorno académico, debido a que los resultados obtenidos enriquecen al área de investigación relacionada al

tratamiento de efluentes residuales de la industria textil, sirviendo como base para futuros estudios sobre coagulantes o métodos de optimización del proceso.

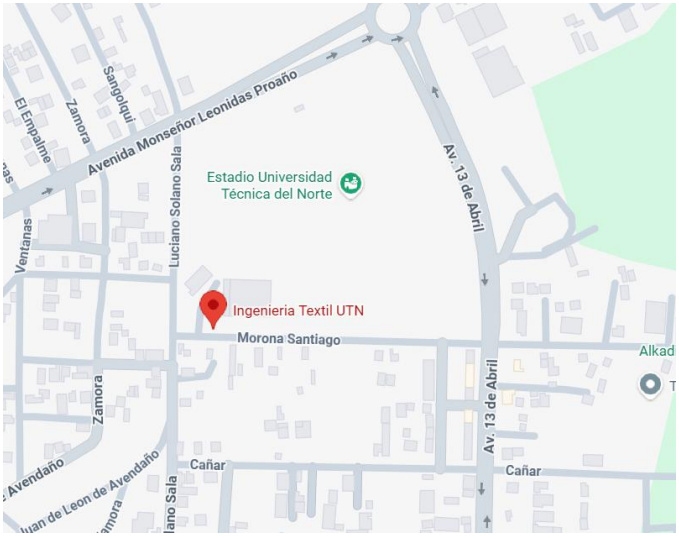
Cabe señalar que uno de los principales problemas que enfrenta la industria textil es la falta de parámetros claros para el tratamiento de estos efluentes, lo que deriva en procesos ineficientes y eso llega a ocasionar posibles sanciones legales. Al establecer las condiciones óptimas del pH y dosificaciones, esta investigación aportará a dicha problemática, mejorando la calidad del agua tratada y promoviendo prácticas más sostenibles

1.5 Características del sitio del proyecto

Como se observa en la **Figura 1**, la fase experimental se desarrolló en la Carrera de Textiles, donde se dispone de laboratorios equipados con maquinaria estandarizada para la ejecución de ensayos bajo parámetros controlados. El laboratorio CTEX, se encuentra ubicado en las coordenadas 0.3782531210228751, -78.12389737777924, garantizando un espacio adecuado y acondicionado para el estudio.

Figura 1

Ubicación del laboratorio CTEX

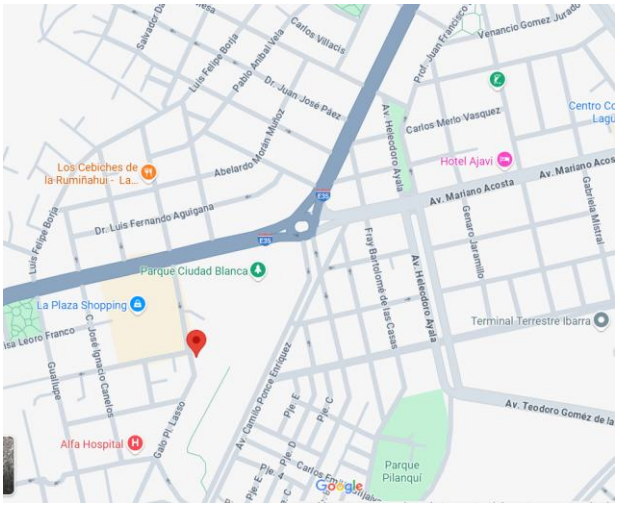


Nota: Ubicación geográfica del laboratorio de la Planta Académica Textil. Fuente: (Google Maps, 2024)

La base experimental de este trabajo se sustenta en el análisis de aguas residuales, para lo cual fue esencial definir un punto de muestreo específico. La **Figura 2** detalla la localización de la empresa de donde se recolectará la muestra, estableciendo así el origen de los datos primarios que serán analizados.

Figura 2

Ubicación de la empresa "IMBATEX"



Nota: Ubicación geográfica de la empresa IMBATEX. Fuente: (Google Maps, 2025)

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE

2.1 Estudios previos

2.1.1 Impacto ambiental de los colorantes

Los colorantes textiles, al no fijarse completamente durante el proceso de teñido, contaminan las fuentes hídricas al ser vertidos como efluentes sin tratamiento, generando un serio problema ambiental (My Huong et al., 2020). Esta situación genera impactos negativos en ecosistemas acuáticos y en la salud pública. Muchas de esas sustancias son tóxicas, persistentes y se bioacumulativas, según Al-Tohamy et al. (2022).

La presencia de colorantes en medios acuáticos altera las condiciones fisicoquímicas y, por ende, su habitad. Hemashenpagam y Selvajeyanthi (2023) indican que estos compuestos obstaculizan el paso de la luz. Con la reducción de la luz se disminuye la generación de oxígeno, la fotosíntesis cae y sobreviven menos organismos acuáticos. En consecuencia, la descarga de efluentes textiles con colorantes deteriora la calidad hídrica y compromete el equilibrio del ecosistema, lo que justifica la aplicación de tratamientos previos a su disposición final.

2.1.2 Aguas residuales de la industria textil

Las industrias textiles se encuentran entre las principales generadoras de aguas residuales contaminadas por tintes y productos químicos auxiliares. Donkadokula et al. (2020) señalan que en los procesos de hilado, teñido y acabado se utiliza grandes volúmenes de agua. También se usan metales pesados, colorantes, compuestos tóxicos y aditivos químicos. El excesivo consumo de agua no solo agrava la escasez de agua. Además, deja efluentes con alta demanda química de oxígeno, lo que exige tecnologías de tratamiento avanzadas como lo indican Ahmed et al. (2022).

Por su toxicidad y porque no son fáciles de degradar, estos contaminantes son una amenaza seria para el ambiente. Antes de su descarga se requiere un tratamiento efectivo. Dong et al. (2025) enfatiza que, sin un tratamiento adecuado, estas sustancias pueden inhibir la fotosíntesis en cuerpos de agua, reducir la solubilidad del oxígeno y bioacumularse en las cadenas tróficas. En este contexto se justifica la implementación de métodos de tratamiento eficaces, como la coagulación-

floculación con sulfato de aluminio, para lograr una remoción significativa de colorantes antes de su vertimiento.

Como menciona Liu (2020), la “selección del tratamiento debe considerar la composición específica de los efluentes, ya que esta varía según el tipo de fibra y el proceso industrial empleado” (p. 1). Considerando esto, refuerza la idea de que no existe una solución universal para el tratamiento de aguas residuales textiles. Por lo tanto, los sistemas de tratamiento deben ser diseñados de forma personalizada y complementarse con técnicas de monitoreo continuo que permitan ajustar los parámetros operativos y optimizar el proceso.

2.1.3 Coagulación–floculación con sulfato de aluminio

El tratamiento de efluentes textiles representa un desafío ambiental prioritario para la industria manufacturera. Diversos estudios han demostrado que entre los métodos disponibles para el tratamiento de aguas residuales se pueden emplear procesos químicos, físicos y biológicos (Dotto et al., 2013). Entre estas alternativas, el proceso de coagulación-floculación se ha posicionado como una solución económicamente viable y efectiva para manejar descargas industriales como las descargas de efluentes textiles (Dutta, 2022).

Sin embargo, se debe considerar que este proceso presenta una notable complejidad técnica, esto se debe a que su eficiencia depende de múltiples factores conectados, como es el pH, la dosificación del coagulante y las características del agua a tratar (Dotto et al., 2013). Por lo tanto, la optimización de estos parámetros resulta clave para alcanzar altos niveles de eliminación de color.

En el ámbito de los tratamientos de aguas residuales, el sulfato de aluminio se reconoce como uno de los coagulantes más utilizados debido a su eficacia en la remoción de color, turbiedad, nutrientes, así como por su capacidad de actuar en diferentes composiciones químicas del agua (Gamas, 2021). Esta efectividad se debe a que funciona como un agente desestabilizador de partículas presentes en los efluentes. El mecanismo de operación se basa en la neutralización de las cargas eléctricas de los colides presentes en el agua, lo que permite la formación de flóculos sedimentables que mejoran significativamente la claridad del efluente tratado.

De acuerdo con Ospina (2020), el sulfato de aluminio presenta alta eficacia en la remoción de contaminantes específicos dentro de ellos están los colorantes y metales pesados. Por este motivo, en la industria textil, este coagulante se ha posicionado como un agente fundamental para disminuir la carga contaminante de los efluentes y ajustarse a los estándares de descarga exigidos por la legislación ambiental actual. Por lo tanto, su aplicación adecuada, considerando parámetros como la dosificación y el control del pH, resulta indispensable para optimizar la eficiencia del desempeño del tratamiento.

2.1.4 Colorante en aguas residuales

Diversos estudios coinciden en que los efluentes textiles contienen una carga significativa de colorantes no fijados. Según Dutta (2022), entre el 20% y el 50% de los colorantes utilizados en procesos de teñido no logran fijarse a las fibras, terminando en las aguas residuales. Como menciona Dutta, estos compuestos destacan por su estructura molecular compleja, que los hace resistentes a degradación biológica o química convencional.

Según Núñez et al. (2023), la industria textil genera un impacto significativo sobre los recursos hídricos, ya que la responsable del 20% de la contaminación del agua mundial, debido a que cerca del 50% de los colorantes utilizados en los procesos de tintura son descargados directamente en cuerpos de agua, por su baja fijación a las fibras o por tratamientos ineficientes. Esto deja claro que esos compuestos no solo quitan la transparencia del agua. Al ser tóxicos y no degradarse, son una amenaza directa para los ecosistemas acuáticos y la salud humana.

Gallego y Rubio (2022) dicen que los colorantes son contaminantes persistentes. Se quedan en el ambiente por mucho tiempo y las plantas de tratamiento convencionales no los eliminan bien. En relación con ello, Ramírez (2023) también lo señala. La industria textil tiene que responder por el impacto que genera en agua, aire y suelo por los químicos que usa. A pesar del desarrollo de iniciativas enfocadas en la sostenibilidad, los avances aun no son suficientes, por lo que continúa siendo fundamental contar con sistemas que sean más eficientes para la disminución de la descarga de colorantes.

Con base en lo expuesto, la persistencia de estos compuestos evidencia no solo una deficiencia técnica, sino también una falta de gestión integral en el control de los efluentes

industriales. En este sentido, resulta fundamental promover el desarrollo de alternativas o técnicas mejoradas, y el fortalecimiento de políticas ambientales más estrictas que incentiven el tratamiento adecuado de aguas residuales. Esto permitiría una eliminación más efectiva de los colorantes antes de su disposición final.

2.2 Marco legal

2.2.1 Constitución de la República del Ecuador

La constitución de la República del Ecuador establece un marco jurídico para la protección ambiental, particularmente relevante para esta investigación sobre tratamientos de aguas residuales textiles. (Constitución de la República del Ecuador, 2008) Menciona que los principales artículos constitucionales aplicables son:

> **Artículo 14.-** "Reconoce el derecho al ´Sumak Kawsay´, declarando de interés público la preservación ambiental, conservación de ecosistemas y recuperación de espacios degradados" (p. 14). Este principio justifica la investigación en métodos de coagulación–floculación económicos para las PYMEs textiles.
>
> **Artículo 66 (Lit.** 27).- Garantiza el derecho ciudadano a "vivir en un ambiente sano, ecológicamente equilibrado, libre de contaminación" (p. 33). En base a este articulo fundamenta la necesidad de desarrollar procesos sostenibles y accesibles para realizar el tratamiento de aguas residuales.
>
> **Artículo 83 (Lit. 6).-** Establece la obligación de "utilizar recursos naturales de modo racional y sostenible" (p. 41).

2.2.2 Líneas de investigación de la Universidad Técnica del Norte

La Universidad Técnica del Norte (UTN), (2022) a través de la resolución N° 122-SO-CU-UTN establece que los proyectos de investigación deben alinearse con las directrices de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENECYT) y con sus propias líneas de investigación institucionales. En la **Tabla 1** se detallan dichas líneas, las cuales constituyen el marco fundamental para el desarrollo de este estudio.

Tabla 1

Líneas de investigación de la Universidad Técnica del Norte

N°	Líneas de investigación de la UTN
1	Producción industrial y tecnología sostenible.
2	Desarrollo forestal agropecuario y forestal sostenible.
3	Biotecnología, energía, recursos naturales renovables.
4	Soberanía, seguridad e inocuidad alimentaria sostenible.
5	Salud y bienestar digital.
6	Gestión de calidad de la educación, procesos pedagógicos e idiomas
7	Desarrollo artístico, diseño y publicidad.
8	Desarrollo social y del comportamiento humano.
9	Gestión, producción, productividad, innovación y desarrollo socioeconómico.
10	Desarrollo, aplicación de software y cyber security.

Fuente: Adaptado de (UTN, 2022).

Este estudio se enmarcará específicamente en dos líneas de investigación institucionales, dada su relevancia para el tema de investigación, el cual se articula con:

1. **Producción industrial y tecnología sostenible:** Línea que promueve el desarrollo de soluciones tecnológicas ambientales responsables para el sector industrial (UTN, 2022).

2.3 Marco conceptual

En esta sección se analiza una documentación proveniente de fuentes verificadas, como revistas indexadas y libros especializados, seleccionados por su capacidad para aportar una comprensión integral de la problemática estudiada.

2.3.1 Fibras textiles

Las fibras textiles pueden ser agrupadas principalmente en base a sus características físicas; sin embargo, es su composición química intrínseca el factor primordial que gobierna su comportamiento durante los procesos de transformación industrial. Moreno (2023) define la fibra textil como filamentos delgados, flexibles y muy alargados. Esos filamentos son la materia prima

base para hacer tejidos. El autor también destaca su forma cilíndrica. Tienen un diámetro muy pequeño frente al largo y a simple vista se ven uniformes.

Con esa definición se entiende que la fibra importa por su forma. Pero también importan sus propiedades físicas y químicas. Esas propiedades definen como se comporta la fibra en el hilado y el tejido. Así, como lo plantea Moreno, la combinación de elasticidad, resistencia y uniformidad es lo que permite su manipulación en los distintos procesos industriales, posibilitando la creación de una amplia variedad de productos con características específicas como la durabilidad y estética.

2.3.1.1 Fibras proteínicas

Dentro del sector textil, las fibras proteínicas constituyen un componente estratégico no solo por su relevancia económica y si valor artesanal, sino también por las implicaciones ambientales que conlleva su procesamiento, particularmente durante la etapa de tintura (Betancourt et al., 2025). Su estructura bioquímica singular, derivada de su origen animal, las diferencias de las fibras naturales vegetales y sintéticas, otorgándoles propiedades funcionales propias.

En este sentido, Shamey y Sawatwarakul (2014) establecen una clasificación fundamental para estos materiales, distinguiendo dos grandes grupos según su estructura y procedencia:

> El primero comprende las fibras de queratina, como la lana y la cachemira, las cuales son obtenidas de los folículos pilosos de diversos mamíferos. El segundo grupo lo forman las fibras secretadas por insectos, siendo la seda, producida por la larva *Bombyx mori* en forma de un filamento continuo y brillante (p. 62).

Dicha clasificación resulta relevante, dado que va más allá del origen y define una distinción estructural que permite prever respuestas distintas durante los procesos de tintura y acabado, aspecto esencial para la calidad del producto final. Giacomni et al. (2017) enfatizan las diferencias funcionales entre estos grupos: “Aunque comparten una base proteica, las fibras de queratina poseen una estructura escamosa que les confiere elasticidad y aislamiento térmico, mientras que las fibras secretadas como la seda destacan por su resistencia y brillo natural” (p. 2).

Este argumento evidencia que la estructura microscópica de las fibras proteínicas determina sus propiedades finales, lo que facilita tanto el mejoramiento de procesos industriales como la elección de materiales orientados a la sostenibilidad.

2.3.2 Colorantes ácidos

Los colorantes ácidos representan un grupo esencial en la industria textil, particlarmente para el teñido de fibras proteínicas como lana y seda, debido a su carácter aniónico y a su afinidad química especifica con estos sustratos. Dutta (2022) los define como compuestos aniónicos derivados de sales de ácidos carboxílicos o sulfónicos, características que les otorga elevada solubilidad en medio acuoso. El autor precisa que, su fijación ocurre principalmente mediante enlaces iónicos entre el colorante y los grupos funcionales cargados positivamente de la fibra, lo que justifica su eficacia en condiciones de un pH acido.

Este planteamiento permite comprender que la interacción entre el colorante y la fibra no depende únicamente de un fenómeno físico, sino de un proceso químico controlado donde el pH y la carga superficial de la fibra son determinantes. Controlar esas variables es clave para fijar el colorante de forma uniforme y estable. Si el pH o la carga superficial fallan, el colorante no se fija de manera homogénea en toda la fibra. Ahí se producen los barrados en la tintura y la calidad del producto baja.

Vaca et al. (2020) también lo dice. Por esa mezcla de interacciones químicas, convierte a los colorantes ácidos en una opción versátil y eficaz para teñir fibras proteínicas como la lana y seda. Esta perspectiva resulta relevante, ya que no solo explica el fundamento químico de la efectividad de los colorantes ácidos, sino que también menciona sus propiedades con los criterios técnicos y de calidad que exige la industria textil. De este modo, se evidencia que la selección de procesos de tintura busca cumplir con estándares de durabilidad y apariencia.

2.3.3 Aguas residuales de la industria textil

Las aguas residuales generadas por las industrias textiles representan uno de los efluentes industriales más complejos y difíciles de tratar, debido a su variada composición química y alta carga contaminante(Chugá et al., 2025). Según Avalos (2023), “las aguas residuales textiles son

generadas durante los distintos procesos de manufactura, especialmente en las etapas de teñido, lavado y acabado de los tejidos o fibras" (p. 24). La afirmación del autor permite dimensionar por qué dichos efluentes contienen sustancias como colorantes no fijados, productos químicos auxiliares, sales, metales pesados y materia orgánica derivada de los tratamientos aplicados a los materiales textiles.

Desde otra perspectiva, Liu (2020) menciona que:

> La composición de las aguas residuales textiles varía según los tipos de fibras, los colorantes empleados y los procesos industriales involucrados. Entre los contaminantes más comunes se encuentran compuestos orgánicos, ácidos y sólidos en suspensión, factores que convierten estos efluentes en un desafío para su tratamiento antes de su vertimiento (p. 2).

La perspectiva de Liu resulta especialmente relevante, ya que demuestra que no existe un modelo único de tratamiento aplicable a todas las industrias textiles. Por el contrario, la variabilidad de los contaminantes exige la implementación de tecnologías adaptativas y sistemas de control específicos según la naturaleza de la producción. Asimismo, esta diversidad química obliga a considerar no solo los impactos inmediatos en el agua y el suelo, sino también los efectos acumulativos sobre los ecosistemas acuáticos y la salud humana.

2.3.4 Métodos de remoción del color

La eliminación del color en aguas residuales provenientes de la industria textil constituye un proceso complejo que demanda la aplicación de métodos especializados, capaces de tratar la diversidad estructural y química de los colorantes sintéticos. Como señalan García y Rivera (2021), "estos métodos combinan principios físicos y químicos para remover las partículas coloidales en suspensión presentes en el agua", lo que evidencia la necesidad de emplear enfoques combinados que optimicen la eficiencia del tratamiento (p. 26).

De acuerdo con Verma et al. (2021), los métodos de tratamiento de aguas residuales pueden clasificarse en dos grandes categorías: Métodos físicos y métodos químicos. Los primeros se caracterizan por el aprovechamiento de fuerzas naturales tales como la gravedad, la atracción

electrostática y las fuerzas der Waals para segregar los agentes contaminantes sin modificar su estructura química (Verma et al., 2021). En este grupo destacan operaciones unitarias como la adsorción, la coagulación-floculación y la filtración por membranas (Nahiun et al., 2021). Debido a su capacidad para mitigar la turbidez y remover de forma eficiente las partículas suspendidas, estos métodos se implementan prioritariamente como tratamientos primarios, optimizando así el rendimiento de las fases subsecuentes del sistema.

Por otra parte, los métodos químicos funcionan por oxidación controlada. La idea es transformar los contaminantes y bajar su toxicidad. Para eso se usan agentes oxidantes fuertes. Los más usados son el ozono, hipoclorito de sodio, peróxido de hidrogeno con fotocatálisis y otros procesos de oxidación avanzada (Ortega y Sánchez, 2021). Pero estos tratamientos solo con viables si se controlan bien las variables. Si la dosis de reactivo falla, sube el costo de operación. Y peor, se puede formar subproductos nuevos, igual de persistentes o más tóxicos.

Con lo mencionado anteriormente, se comprende que la elección del método de remoción del color depende de múltiples factores, tales como la naturaleza del colorante, la concentración de contaminantes, la composición del efluente y las condiciones económicas de la planta de tratamiento.

2.3.5 Coagulación–floculación

La coagulación – floculación constituye una de las etapas más relevantes dentro del tratamiento de aguas residuales textiles, al ser un proceso que permite la eliminación de una parte significativa de los contaminantes suspendidos y disueltos. Como explican Fernández y Ruiz (2020), se trata de “un proceso fisicoquímico esencial en el tratamiento de aguas que combina dos etapas complementarias para remover partículas coloidales” (p.28).

García y Rivera (2021) demuestran que “la coagulación se realiza mediante agentes químicos que neutralizan las cargas electrostáticas de las partículas suspendidas, provocando su desestabilización y formación de microflóculos; este proceso puede eliminar del 80% al 90% de turbidez y materia orgánica presente en el agua” (p. 26). Con base en lo anterior, se deduce que la eficacia de la coagulación depende de factores como el tipo de coagulante a utilizar, el pH y la velocidad de mezcla. El control apropiado de estas variables mejora el desempeño del proceso y,

al mismo tiempo, reduce el uso de productos químicos, aportando a la sostenibilidad económica y ambiental.

Por su parte, Rivera (2020) señala que “la floculación se realiza a través de una agitación lenta, durante la cual los microflóculos se aglomeran gracias a fuerzas de Van der Waals, formando macroflóculos con mayor tamaño y peso que faciliten su sedimentación” (p. 27). La explicación de Rivera evidencia la función complementaria entre coagulación y floculación: la primera desestabiliza las partículas suspendidas y la segunda promueve su aglomeración en solidos removibles. Por lo tanto, el control de variables operacionales como la velocidad de agitación y el tiempo de retención sea imprescindible para impedir la ruptura de los flóculos y alcanzar un desempeño óptimo del proceso.

2.3.6 Sulfato de aluminio

El sulfato de aluminio ($Al_2 (SO_4)_3$) es un compuesto químico inorgánico, ampliamente utilizado como coagulante en el tratamiento de agua potable, aguas residuales y procesos industriales. Según la Distribuidora de Químicos Industriales S. A. [DQI S.A.] (2020), su principal aplicación es la eliminación de partículas suspendidas y microorganismos mediante la desestabilización de coloides, proceso que facilita la posterior sedimentación y clarificación del agua.

Esto confirma la importancia del $Al_2(SO_4)_3$ dentro de los tratamientos fisicoquímicos, ya que su acción como coagulante no se limita a optimizar las características visuales del efluente. En consecuencia, su aplicación contribuye de manera significativa el cumplimiento de la normativa ambiental.

Así mismo, la DQI S.A. (2020) señala que el sulfato de aluminio se comercializa en diversas presentaciones físicas, entre ellas polvo, gránulos, escamas y solución líquida, siendo la forma en polvo la más utilizada debido a su practicidad en almacenamiento, transporte y dosificación. Esta variable de formatos permite adaptar el coagulante a diferentes escalas y condiciones operativas, desde plantas de tratamiento de aguas residuales municipales hasta procesos industriales específicos.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Enfoque de la investigación

La presente investigación tiene un enfoque cuantitativo, que busca analizar de forma objetiva la efectividad del sulfato de aluminio en la remoción de color de aguas residuales provenientes de la tintura de fibras proteínicas. Este enfoque permitió recopilar, medir y analizar datos experimentales con el propósito de establecer relaciones entre las variables de estudio. De acuerdo con Haro et al. (2024), “los estudios cuantitativos se caracterizan por su capacidad de verificar hipótesis mediante el análisis estadístico, lo que asegura la validez y reproducibilidad de los resultados obtenidos” (p. 3–4).

3.2 Tipos de investigación

3.2.1 Investigación Experimental

Este estudio adapta un enfoque experimental, dado que se manipularon variables específicas. Según Rodríguez (2020), “la investigación experimental permite analizar relaciones causa–efecto mediante la modificación controlada de una o más variables” (p. 1). En este caso, las variables independientes (VI) son los niveles de pH (5, 6, 7) y la dosis de sulfato de aluminio (50; 100; 200; 400 mg/L), mientras que la variable dependiente (VD) es el porcentaje de remoción de color en las aguas residuales.

El diseño experimental constituye una herramienta fundamental para validar hipótesis relacionadas con la búsqueda de condiciones óptimas en el tratamiento de efluentes provenientes de procesos de tintura de fibra proteínicas. En este sentido, Villanueva (2022) “señala que este tipo de diseño facilita la generación de datos confiables con aplicación industrial” (p. 1). Desde esta perspectiva, se reconoce que contar con evidencia experimental sólida es esencial para trasladar los resultados del laboratorio hacia prácticas más eficientes y sostenibles dentro del sector textil.

3.2.2 Investigación Analítica

En el presente trabajo de grado se aplicó un enfoque analítico para examinar la efectividad del sulfato de aluminio en el tratamiento de aguas residuales textiles. Como señalan Lopera et al. (2010), este método permite descomponer el proceso de coagulación–floculación en sus componentes, como lo es el pH, la dosis de $Al_2(SO_4)_3$ y la eficiencia de remoción de color para entender sus interrelaciones.

De acuerdo con Habler (2009), el análisis documental "revela las conexiones entre las variables del estudio" (p. 1). Con esta metodología se ordena toda la información que hay. También sirve para interpretar con criterio los resultados que salen del laboratorio. En esta investigación la técnica se usa para tres cosas: ver como interactúan los pH y dosis del coagulante, revisar los porcentajes de remoción de color que se obtiene, y dejar recomendaciones técnicas que se puedan aplicar directo en planta textil.

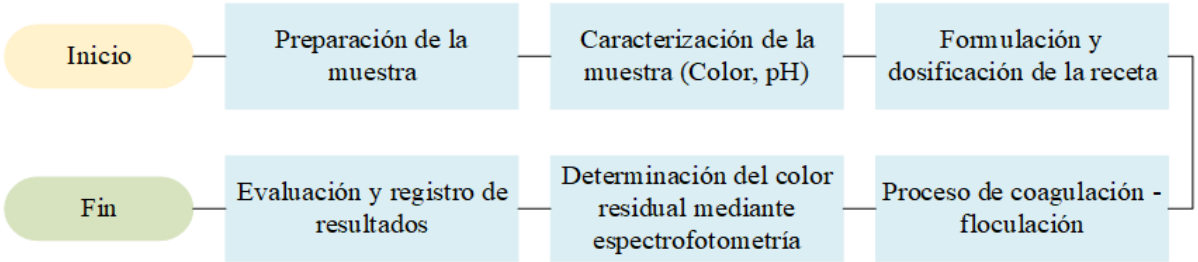
3.3 Flujogramas

3.3.1 Flujograma del proceso general

En la **Figura 3** se presenta el diagrama de flujo correspondiente al procedimiento desarrollado para evaluar la efectividad del sulfato de aluminio a diferentes niveles de pH en la remoción de color de aguas residuales provenientes de la tintura de fibras proteínicas. En este contexto, se comprende que el diagrama no solo organiza visualmente las actividades, sino que también permite identificar la relación lógica entre cada paso, facilitando así la reproducibilidad del proceso.

Figura 3

Flujograma general



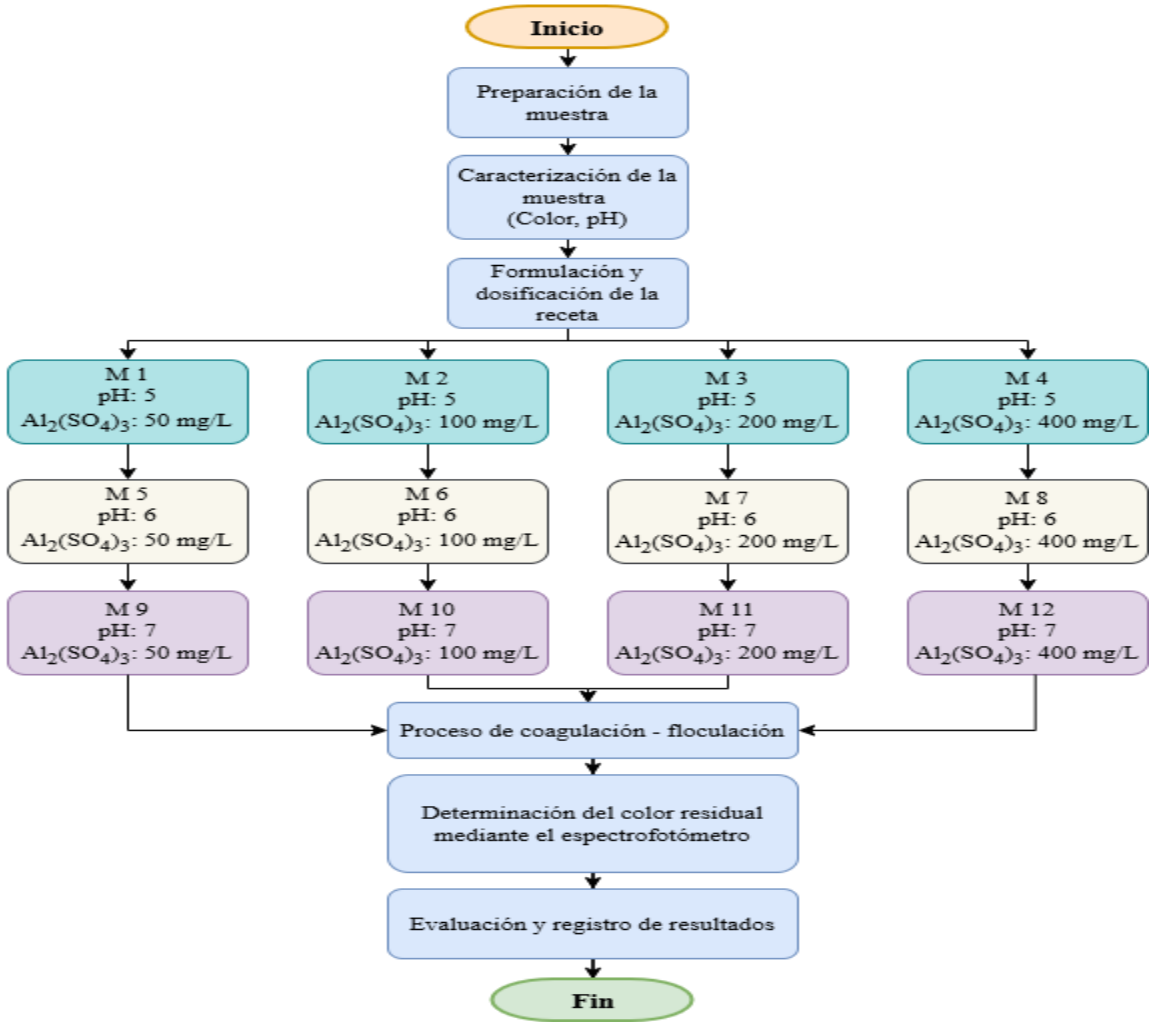
Fuente: Propia

3.3.2 Flujograma del proceso muestral

En la **Figura 4** se presenta el proceso muestral utilizado para evaluar la efectividad del sulfato de aluminio a diferente pH en la eliminación del color de las aguas residuales de tintura de fibras proteínicas en el proceso de coagulación–floculación. En este diagrama se visualizan de manera ordenada las actividades realizadas desde la toma de las muestras hasta la preparación y posterior análisis en laboratorio. Su estructura, muestra el orden del procedimiento paso a paso. Cada etapa se hace de forma sistemática. Eso mantiene la investigación consistente. Y también ayuda a mantener la consistencia de la investigación, ya que facilita la replicación del proceso.

Figura 4

Flujograma muestral



Fuente: Propia.

3.4 Materiales y equipos

Para esta investigación se usaron equipos y materiales específicos. Para así, poder evaluar la efectividad del sulfato de aluminio en el tratamiento de aguas residuales de fibras proteínicas. Estos recursos fueron seleccionados para garantizar la precisión en la medición de parámetros clave. A continuación, se detallan las especificaciones técnicas y el rol de cada equipo en el proceso experimental:

3.4.1 Espectrofotómetro Color I5 X-Rite

Es un instrumento clave en esta investigación, para cuantificar la efectividad del sulfato de aluminio en la remoción de color. Según Días (2024), este equipo mide la transmitancia de la luz a través de las muestras de agua residual, permitiendo calcular el porcentaje de color presente mediante el método CIELAB D65/10. Como componente fundamental en la validación metodológica, la **Figura 5** muestra el espectrofotómetro que fue utilizado en este estudio. La elección de este equipo se debe a su capacidad para proporcionar mediciones precisas en el rango de 360 nm a 750 nm, garantizando así la confiabilidad de los datos experimentales.

Figura 5

Color I5 X–Rite



Fuente: Propia

Los datos de transmitancia se registraron en Excel y se analizaron estadísticamente para determinar el porcentaje de remoción de color y la eficiencia comparativa en diferentes niveles de pH (3,5 – 5) y dosis de sulfato de aluminio (5 – 20 mg/L). En la **Tabla 2** se muestran las especificaciones técnicas del equipo, el cual permite evaluar el porcentaje de color presente en las muestras de agua residual, para determinar la efectividad del sulfato de aluminio en la remoción del color.

Tabla 2

Especificaciones técnicas del Color i5 X–Rite

Datos técnicos	
Geometría óptica	d/8°
Repetibilidad	0,03 RMS Delta E Cielab
Acuerdo inter – instrumental	0,15 Avg. Delta E Cielab
Iluminación	Xenón Pulsado
Rango espectral	360 nm a 750 nm
Intervalo de longitud de onda	10 nm
Rango fotométrico	0,0% a 200% de reflectancia
Resolución fotométrica	0.01%
Tiempo de medición	2,5 segundos

Fuente: Adaptado de (i5 X - Rite, 2013)

3.4.2 Balanza analítica

La balanza analítica es un equipo fundamental en el laboratorio para obtener mediciones de masa de alta precisión. Boeckel (2021) señala que este “equipo posee una capacidad máxima de 750 g y una sensibilidad de 0.0001 g, perteneciendo a la clase 1 de dispositivos de pesaje” (p. 2). A partir de dicha caracterización técnica, se evidencia que su exactitud resulta un factor determinante para garantizar la confiabilidad de los resultados, sobre todo al manipular pequeñas cantidades del coagulante a utilizar.

En este estudio, la balanza permitió medir con exactitud el $Al_2(SO_4)_3$ y preparar soluciones con concentraciones estandarizadas, asegurando la consistencia experimental. La **Figura 6** presenta el equipo empleado en el laboratorio de la planta textil. La precisión de este dispositivo es fundamental para la reproducibilidad de los datos experimentales, un requisito indispensable considerando el uso de dosis mínimas de coagulante, las cuales se situaron en un margen entre 5 y 20 mg/L, valores que requieren un control meticuloso para evitar desviaciones en los resultados de remoción de color.

Figura 6

Balanza analítica



Fuente: Propia

3.4.3 Agitador digital magnético

Esta máquina de agitación magnética es un equipo de laboratorio utilizado para realizar procesos de agitación controlada, especialmente en ensayos de coagulación–floculación a escala de laboratorio. Este equipo fue seleccionado debido a su capacidad para mantener condiciones constantes de mezcla, lo cual resulta fundamental para evaluar la efectividad del sulfato de aluminio como coagulante. En la **Tabla 3** se presentan las especificaciones técnicas del agitador magnético empleado, las cuales establecen los rangos operativos adecuados para su uso durante la fase experimental del trabajo investigativo que se realizará.

Tabla 3

Especificaciones técnicas del agitador magnético

Descripción	Característica
Capacidad de mezcla	10 L
Rango de velocidad	100 – 1500 rpm
Temporizador	Continuo y cuenta regresiva
Ambiente de trabajo	5 – 40 °C y 80% HR

Fuente: Adaptado de (Biomed Instruments, 2025).

Para el desarrollo de los ensayos de coagulación–floculación, se empleó el agitador magnético, el cual se observa en la **Figura 7**, el cual permitirá trabajar una muestra a la vez bajo condiciones controladas. Este equipo se utilizó inicialmente para mezclar el agua residual con el sulfato de aluminio durante la etapa de coagulación y, posteriormente, para mantener una agitación controlada durante la etapa de floculación. Su utilización fue determinante para simular condiciones reales de tratamiento a nivel de laboratorio y asegurar la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Figura 7

Agitador digital magnético



Fuente: Propia

3.4.4 Sulfato de aluminio

El $Al_2 (SO_4)_3$ es una sal inorgánica disponible en presentación de polvo color blanquecino; fue seleccionado como coagulante principal en esta investigación. De acuerdo con Potosí (2023), este compuesto se emplea en el tratamiento de aguas por su capacidad para neutralizar las cargas negativas de partículas coloidales, promoviendo su aglomeración y posterior remoción (p. 1). En este estudio, las características técnicas y el grado de pureza del reactivo influirían en la eficiencia de eliminación de colorantes ácidos en aguas residuales de fibras proteínicas, ya que determinan la formación y calidad de los flóculos durante el proceso de coagulación–floculación. En la **Tabla 4** se detallan las especificaciones técnicas del sulfato de aluminio utilizado en los ensayos experimentales.

Tabla 4

Datos técnicos del sulfato de aluminio

Descripción	Características
Nombre comercial	Sulfato de aluminio
Fórmula	$Al_2(SO_4)_3$
Apariencia	Granos
Peso molecular	549.14 g/mol
Solubilidad en agua	31.2/100 mL

Fuente: Adaptado de (Aris Industrial S. A., 2025)

3.4.5 Elementos para el proceso de laboratorio

Para el desarrollo de la fase experimental de esta investigación, se emplearon diversos materiales de laboratorio que permitieron ejecutar con precisión y reproducibilidad las pruebas de coagulación–floculación. A continuación, en la **Tabla 5**, se detallan los materiales utilizados en los ensayos. Estos fueron seleccionados conforme a los requerimientos técnicos del estudio, garantizando las condiciones adecuadas para la formación y observación de flóculos.

Tabla 5

Elementos de laboratorio

Materiales	Características
Matraz de Erlenmeyer	250 mL
Pipetas	0,1 mL y 0,01 mL
Papel pH	Papel
Pinzas	Metal
Botellas de muestra	Vidrio
Porta muestras de cubeta	Vidrio

Fuente: Autor

3.5 Normas de referencia

Para garantizar la validez de los resultados en la evaluación del sulfato de aluminio, esta investigación sigue las normas técnicas ecuatorianas (NTE). Esas normas estandarizan como se toma la muestra y como se maneja el agua residual textil. También indica qué norma se utilizó en el espectrofotómetro para determinar la presencia del color en el agua residual.

3.5.1 NTE INEN 2176:1998

Para evaluar la eficiencia del sulfato de aluminio como un agente coagulante, se aplicó esta norma técnica en la toma de muestras del efluente textil posterior al proceso de tintura, registrando así el pH inicial y características visuales como lo es el color. Dicha norma establece los protocolos para el muestreo puntual manual de aguas residuales, condición indispensable para asegurar la representatividad de las muestras y, por ende, la validez de los resultados de la investigación.

De acuerdo con la norma NTE INEN 2 176 (1998), la muestra por recolectar será individual y se obtendrá manualmente. Para este proceso, se utilizó un equipo adecuado, el cual consiste en una cubera o botella de vidrio de boca ancha. Además, el registro de la información será obligatorio e incluirá la localización exacta del punto de muestreo, la fecha y hora de recolección, el método utilizado (p. 2, 6, 9 – 10). En este contexto, la muestra de efluente de tintura de lana, específicamente de la empresa “IMBATEX”, se recolectó siguiendo esos criterios. Además, los

datos registrados permitieron replicar el muestreo y validar los resultados experimentales relacionados con el sulfato de aluminio.

3.5.2 NTE INEN 2169:2013

Establece los procedimientos para el manejo, conservación y transporte de muestra de agua cuando su análisis debe realizarse en laboratorio. En el marco de esta investigación, fue necesario aplicar los lineamientos definidos por esta normativa para garantizar la calidad y representatividad de las muestras durante todo el proceso.

En primer lugar, la normativa específica que los recipientes utilizados para la recolección deben ser de vidrio y estar previamente lavados con agua destilada, con el fin de evitar cualquier tipo de contaminación que altere los análisis fisicoquímicos, especialmente parámetros de pH y color (NTE INEN 2169, 2013, p. 1–4). Asimismo, durante el llenado de la botella, se procuró que quede completamente lleno, con el propósito de minimizar el contacto con el aire y prevenir cambios en el pH que puedan afectar la evaluación del proceso de coagulación-floculación.

Finalmente, la normativa establece que el transporte y almacenamiento de la muestra deben realizarse bajo condiciones controladas, evitando su exposición a la luz y al calor, factores que podrían modificar sus propiedades. En la presente investigación, la muestra del efluente procedente de la empresa “IMBATEX” fue trasladada conforme a dicha disposiciones, lo que garantizó la estabilidad de sus características desde la recolección hasta su ingreso al laboratorio de la planta académica textil para el análisis correspondiente (NTE INEN 2169, 2013, p. 6-7).

3.5.3 CIELAB D65/10°

El método CIELAB D65/10° constituye un estándar esencial para la medición y control del color, ampliamente utilizado en industrias como la textil, donde la exactitud cromática determina la calidad del producto. Este sistema se basa en el espacio del color CIELAB, el cual, según Datacolor (2022), describe cada color mediante tres ejes principales:

- **L:** Luminosidad de 0 - 100
- **a:** Eje cromático CIELAB $(-a: verde;\ +a: rojo)$
- **b:** Eje cromático CIELAB $(-b: azul;\ +b: amarillo)$

La referencia D65/10° refiere a dos condiciones específicas de observación:

En primer lugar, el **iluminante D65** simula la luz diurna con una temperatura de color de 6500 k, lo que permite realizar evaluaciones visuales bajo condiciones normalizadas y reproducibles (Datacolor, 2022). En segundo lugar, el **observador 10°** es un ángulo de visión más amplio. Ese ángulo da más precisión al medir el color y representa mejor como se ve el color en superficies externas, según Datacolor (2022).

Datacolor también plantea que el espacio CIELAB describe el color con números. Gracias a eso se puede comparar muestras de forma objetiva. Así se evita la subjetividad inherente a la percepción visual humana. En el sector textil, dicha objetividad resulta crucial para asegurar la uniformidad cromática entre lotes de los tejidos y para mantener la estabilidad del color a lo largo de los procesos de teñido.

3.6 Procedimiento

3.6.1 Obtención de la muestra

La muestra de agua residual fue recolectada en la empresa “IMBATEX” específicamente del proceso de tintura de lana. Para garantizar la confiabilidad de los análisis, los recipientes utilizados para la recolección fueron previamente lavados con agua destilada, asegurando la eliminación de cualquier residuo que pudiera alterar los resultados, como lo puede observar en la **Figura 8**. La toma de la muestra se realizó siguiendo los lineamientos establecidos en la norma NTE INEN 2169:2013 y la norma NTE INEN 2176:1998, lo que permitió asegurar su representatividad, reproducibilidad y adecuado manejo durante el traslado al laboratorio.

Figura 8

Obtención del agua residual



Fuente: Propia

Como se observa en la imagen, el agua residual se obtuvo al instante de terminar la tintura, misma que presenta una temperatura de 60 °C, cada botella de vidrio tiene la capacidad de dos litros, en la cual se colocó el efluente. Al final del llenado cada envase fue tapado, para su transporte hacia el laboratorio, ubicándolas en un lugar donde no le dé luz directa para que no influya en los parámetros a evaluar.

3.6.2 Formulación y dosificación de la receta

Como se observa en la **Figura 4**, en la cual se detallan las dosificaciones y el pH final de cada una de las muestras a realizar. Esta figura sirvió como guía para iniciar el proceso de formulación y dosificación de los productos químicos utilizados. Con el fin de garantizar la exactitud del volumen de trabajo, se empleó una probeta graduada de vidrio, con la cual se midieron 200 mL para cada una de las 12 pruebas experimentales. Este control volumétrico permitió estandarizar el procedimiento y asegurar la reproducibilidad de los resultados en las etapas posteriores del tratamiento con sulfato de aluminio.

Figura 9

Preparación de las muestras



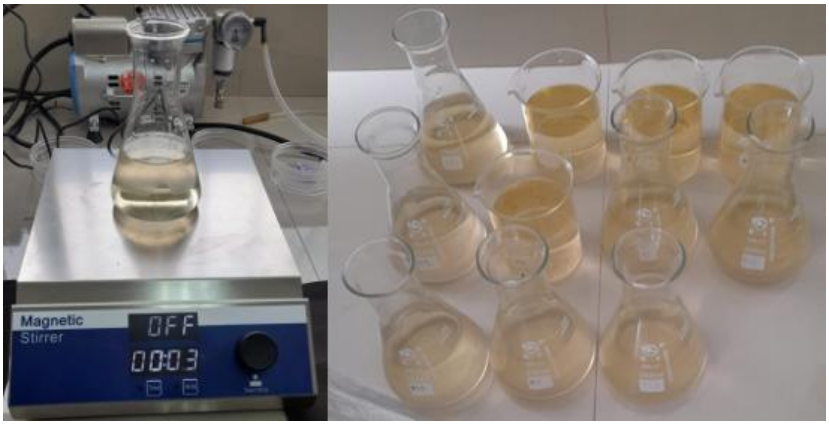
Fuente: Propia

3.6.3 Proceso de coagulación–floculación

En primer lugar, se midió el pH inicial de la muestra, en el cual se obtuvo un pH de 4. Posteriormente, se adicionó álcali para subir el pH. Posteriormente, se realizó la dosificación del coagulante (**Figura 10**), se colocó la muestra en la máquina de agitación magnética, donde se realizó la mezcla durante 15 segundos a una velocidad de 100 rpm.

Figura 10

Proceso de agitación



Fuente: Propia

A término de los 15 segundos de agitación, se midió nuevamente el pH de la muestra con el coagulante añadido. En caso de ser necesario, se realizó un ajuste adicional mediante la dosificación de álcali o acido hasta alcanzar el pH establecido (ver **Anexo 5**). Después de eso se dejó a dejar reposar las muestras 24 horas. Este procedimiento se repitió para cada una de las muestras analizadas.

3.7 Pruebas de laboratorio

3.7.1 Prueba de transmitancia en espectrofotómetro

La caracterización inicial de la muestra de agua residual se llevó a cabo mediante una prueba de transmitancia utilizando un espectrofotómetro, como se puede observar en la **Figura 11**. Los valores obtenidos en esta fase se establecieron como línea base para evaluar la eficiencia del proceso de coagulación-floculación posterior. Esta medición inicial resulta indispensable, puesto que define el estado original del agua residual previo a cualquier intervención química, permitiendo cuantificar la remoción de color atribuible al tratamiento.

Figura 11

Prueba de transmitancia



Fuente: Propia

Posteriormente, se realizó la medición mediante transmitancia en las muestras tratadas, con el fin de comparar los resultados obtenidos con la muestra base. A partir de estas mediciones se obtuvo los valores de $\Delta Ecmc$, los cuales se presentan en el **Anexo 7** y **Anexo 8**. Estos parámetros resultan cruciales para la investigación, ya que permiten cuantificar de forma objetiva la variación del color y evaluar la eficiencia del sulfato de aluminio en la remoción de color del efluente textil.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de la prueba de transmitancia en el espectrofotómetro, con la cual se permitió cuantificar la variación del color del efluente antes y después del tratamiento de coagulación–floculación. Dado que el análisis se orienta a la remoción del color, se empleó como indicador principal el parámetro $\Delta Ecmc$, debido a su mejor correlación con la percepción humana. La comparación se realizó respecto a la muestra sin tratar (M0), por lo que valores mayores de $\Delta Ecmc$ representan un mayor cambio cromático respecto al efluente original y, por lo tanto, una mayor remoción visual bajo las diferentes condiciones de pH y dosificación de sulfato de aluminio.

4.1.1 Resultados del cambio de color

La **Tabla 6** presenta los valores obtenidos del cambio de color para las doce muestras tratadas mediante el proceso de coagulación-floculación, agrupadas según el potencial hidrógeno y la dosificación del agente coagulante $Al_2(SO_4)_3$. En este estudio, el parámetro $\Delta Ecmc$ se utiliza como indicador principal para estimar la remoción del color, al comparar cada tratamiento frente a M0.

Tabla 6

Resultados del cambio de color de las aguas residuales

Ítem	Valoración											
Muestras	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
mg/L $Al_2(SO_4)_3$	50	100	200	400	50	100	200	400	50	100	200	400
pH	5	5	5	5	6	6	6	6	7	7	7	7
$\Delta Ecmc$	0.95	1.46	1.06	1.28	1.17	1.28	2.83	3.03	1.67	1.70	1.58	1.70

Fuente: Propia

Los resultados evidencian que la magnitud del cambio de color varía según las condiciones de tratamiento. Para pH 5, los valores de $\Delta Ecmc$ se ubican entre 0,95 y 1,46, indicando una diferencia baja a moderada respecto al efluente sin tratar. En pH 7, los valores se encuentran entre 1,58 y 1,70, lo que sugiere un cambio perceptual relativamente uniforme entre dosificaciones. En contraste, los valores más altos de $\Delta Ecmc$ se obtienen a un pH 6, especialmente con 200 mg/L (2.83) y 400 mg/L (3.03), lo que indica una mayor diferencia de color con la M0 y, por lo tanto, una mayor remoción del color bajo estas condiciones. Este comportamiento sugiere que el pH 6, combinado con dosificaciones altas de coagulante, favorece el cambio cromático asociado a la reducción del color residual presente en el efluente.

4.2 Análisis de confiabilidad

Para el análisis de confiabilidad de los resultados experimentales y sustentar estadísticamente la comparación entre tratamientos, se realizó un análisis de los datos obtenidos en las mediciones espectrofotométricas. El objetivo del estudio es evaluar la remoción visual del color. Por eso la variable principal fue $\Delta Ecmc$. Debido a su mayor semejanza con la percepción visual. Para el análisis estadístico se usó el software PAST 4. Con ese programa se aplican pruebas de normalidad, se comparan grupos y se sacan tablas y gráficos. Toso eso ayuda a entender los datos del laboratorio, como indican Flores & Flores (2021).

4.2.1 Normalidad de los datos

La evaluación de normalidad se efectuó con el propósito de determinar si los valores de $\Delta Ecmc$ presentan una distribución compatible con los supuestos de pruebas paramétricas. La decisión se basa en el valor p; cuando $p < 0,05$ se rechaza la prueba, mientras que si $p > 0,05$ no se evidencia desviación significativa respecto a una distribución normal, asumiéndose un nivel de confianza del 95%. En esta investigación se aplicaron las pruebas de Shapiro-Wilk, debido a que el tamaño de la muestra es reducido $(n = 12)$, condición idónea para este tipo de análisis de normalidad. La **Figura 12** presenta los resultados de las pruebas realizadas aplicando los datos del cambio cromático, evaluando mediante $\Delta Ecmc$ para las distintas dosificaciones analizadas.

Figura 12

Normalidad de datos

Tests for normal distribution

	50	100	200	400
N	3	3	3	3
Shapiro-Wilk W	0,952	0,9932	0,9463	0,9173
p(normal)	0,5782	0,8428	0,5535	0,443
Anderson-Darling A	0,2436	0,197	0,2501	0,2836
p(normal)	0,4359	0,5956	0,4141	0,316
p(Monte Carlo)	0,5908	0,8449	0,5442	0,4393
Lilliefors L	0,2665	0,2045	0,2721	0,2967
p(normal)	0,5712	0,8994	0,5379	0,3989
p(Monte Carlo)	0,578	0,8373	0,5597	0,437
Jarque-Bera JB	0,3759	0,2962	0,3853	0,4285
p(normal)	0,8287	0,8624	0,8248	0,8071
p(Monte Carlo)	0,5769	0,8413	0,5421	0,4336

Fuente: Propia

De acuerdo con los resultados todas las dosificaciones evaluadas presentaron valores de significancia superiores de $p = 0{,}05$. Se obtuvieron valores de $p = 0.5782$ ($50\ mg/L$), $p = 0.8428$ ($100\ mg/L$), $p = 0.5535$ $(200 mg/L)$ y $p = 0.443$ $(400 mg/L)$; por lo tanto, no se evidencia una desviación estadísticamente significativa respecto a la normalidad de los datos de $\Delta Ecmc$, lo que respalda la consistencia del comportamiento estadístico de la variable y permite su análisis comparativo entre grupos.

4.2.2 Análisis de prueba no paramétrica

Aunque la prueba de Shapiro-Wilk indicó que los datos de $\Delta Ecmc$ no presentan desviaciones significativas respecto a normalidad, se consideró metodológicamente pertinente aplicar un contraste no paramétrico debido al tamaño muestral total y a la naturaleza comparativa del estudio entre múltiples condiciones experimentales. Se usó la prueba de Kruskal-Wallis. Esa prueba compara tres o más grupos independientes. No pide que las varianzas sean iguales. Por eso sirve para ver si hay diferencias en la mediana de $\Delta Ecmc$ entre los tratamientos de los efluentes. La **Tabla *7*** resumen el análisis de $\Delta Ecmc$. Con esa tabla se revisa si hay diferencias significativas en el cambio de color entre los grupos.

Tabla 7

Prueba no paramétrica del cambio de color

Resumen de Kruskal–Wallis	
N	12
H	4.192
Hc	4.192
Valor p	0.1229

Fuente: Propia

La prueba de Kruskal-Wallis dio un valor estadístico H = 4.192 y un valor de p = 0.1229, dado que el valor p es mayor que 0,05, no se evidencia una diferencia estadísticamente significativamente entre las distribuciones de los grupos comparados para $\Delta Ecmc$. Por lo tanto, desde un enfoque de inferencia global, las variaciones del cambio cromático no permiten afirmar diferencias significativas entre los grupos evaluados.

4.3 Discusión de resultados

Los resultados obtenidos en el presente trabajo de grado fueron evaluados mediante el coeficiente de variación, calculado con el software PAST 4, y complementados con el análisis gráfico elaborado en Microsoft Excel, lo que facilitó la interpretación de los datos obtenidos a partir de las mediciones realizadas en el espectrofotómetro. Estas mediciones permitieron cuantificar la eficiencia de remoción del color en las aguas residuales de tintura de fibras proteínicas tratadas con sulfato de aluminio.

Los valores obtenidos evidencian el comportamiento del proceso de coagulación–floculación ante las diferentes dosificaciones del coagulante y niveles de pH evaluados. Estos resultados permitieron analizar la estabilidad y consistencia del tratamiento, así como determinar la influencia de cada variable sobre la eficiencia de remoción de color del efluente textil.

4.3.1 Análisis de resultados de remoción del color

En este apartado se presenta el análisis e interpretación de los resultados obtenidos en el proceso de remoción de color de las aguas residuales de tintura de fibras proteínicas, tomando

como variable principal $\Delta Ecmc$, debido a su mayor correspondencia con la percepción visual. El análisis usó el coeficiente de variación y gráficas comparativas. Con eso se revisó cómo cambió la eficacia del tratamiento con las distintas dosis de sulfato de aluminio (50, 100, 200, 400 mg/L) y niveles de pH (5, 6, 7). Así se pudo ver esas variables afectan de forma clara la estabilidad y efectividad de la coagulación–floculación.

Análisis comparativo de la remoción de color a diferentes dosificaciones.

Para evaluar el efecto de la dosificación del coagulante sobre la remoción del color, en la **Tabla 8** se agruparon los valores de $\Delta Ecmc$ según cada dosificación, considerando el comportamiento a través de los tres niveles de pH evaluados. Para cada grupo se calculó la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación porcentual (CV%).

Tabla 8

Comparación de ΔEcmc por dosificación

Dosificación $Al_2(SO_4)_3$	Media $\Delta Ecmc$	σ	CV %
50	1.263	0.369	29.21
100	1.480	0.211	14.24
200	1.832	0.910	49.89
400	2.003	0.9114	45.60

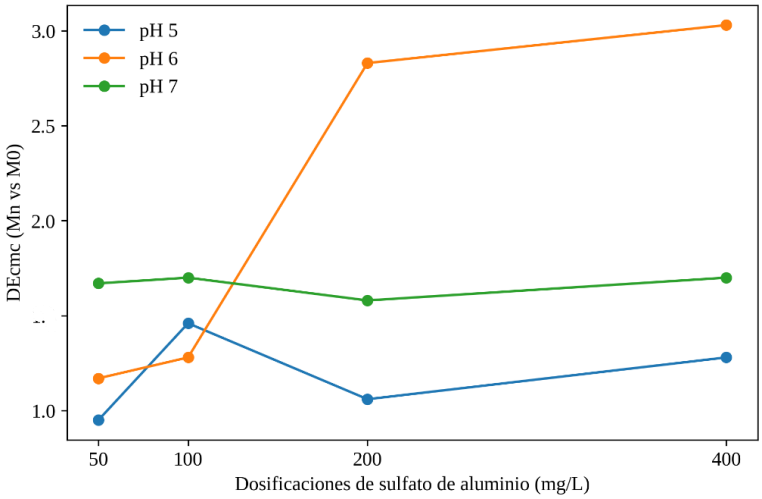
Fuente: Propia

En la tabla se observa la eficacia promedio; la dosificación de 400 mg/L presentó la mayor media de $\Delta Ecmc$ (2.003), seguida de 200 mg/L (1.823), lo que sugiere que, en promedio, estas dosificaciones generan un mayor cambio respecto al efluente sin tratar. Sin embargo, ambas condiciones muestran alta variabilidad relativa, lo cual indica que su desempeño depende fuertemente del pH. Por el contrario, 100 mg/L exhibe el CV más bajo (14.24%), evidenciando un comportamiento más estable a través de los resultados que sugieren que el incremento de

dosificación no garantiza por sí solo una respuesta uniforme y que el pH influye significativamente en la remoción.

Figura 13

Comparación de ΔEcmc por dosificación



Fuente: Propia

Como se observa en la **Figura 13**, la influencia del pH en la remoción del color se evidencia con mayor intensidad con las dosificaciones de 200 y 400 mg/L con un pH 6, donde se registran los mayores cambios cromáticos. En contraste, las dosificaciones de 50 y 100 mg/L el cambio es menor lo que sugiere una eficiencia reducida. Por otro lado, los tratamientos realizados con un pH 7 presentan una remoción intermedia y, además un comportamiento estable entre todas las dosis evaluadas. Finalmente, las condiciones trabajadas con un pH 5 son las que muestran la menor remoción del color en las probetas.

Análisis comparativo del cambio de color a diferentes pH.

Para analizar la influencia del pH en la remoción del color, se realizó una comparación de los valores de $\Delta Ecmc$ por pH, considerando las dosificaciones del agente coagulante. Para cada pH se calculó la media, la DE y CV%, con el fin de ver la eficacia promedio y la dispersión de los datos. De este modo, la **Tabla 9** permite identificar el pH que genera mayor diferencia con relación al efluente sin tratar y al mismo tiempo establecer qué tan consistente es dicha respuesta dentro de cada nivel de pH.

Tabla 9

Comparación de ΔEcmc por pH

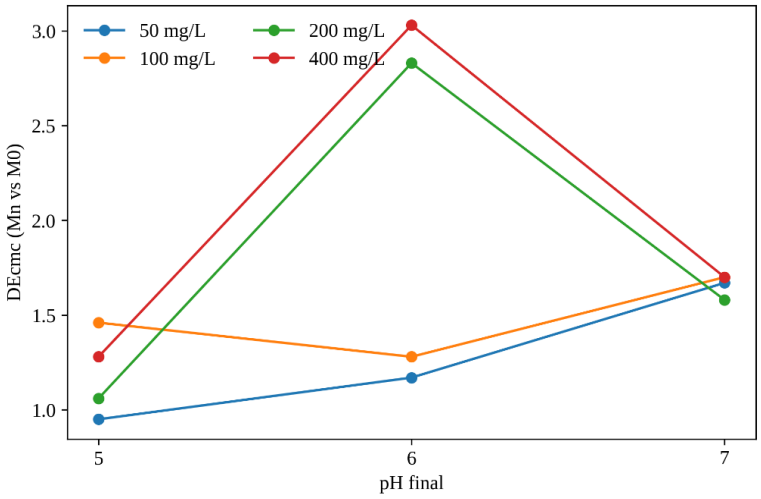
pH	Media $\Delta Ecmc$	DE	CV%
5	1.188	0.228	19.17
6	2.078	0.989	47.59
7	1.662	0.057	3.42

Fuente: Propia

El pH 6 presenta la mayor media de $\Delta Ecmc$ (2.078), lo que sugiere que este nivel favorece una mayor remoción visual del color respecto a M0. No obstante, su CV% elevado (47,59%) evidencia que el resultado de pH es muy sensible a la dosificación, mostrando tratamientos con cambios moderados y otros con cambios muy altos. En contraste, el pH 7 muestra un comportamiento altamente consistente (CV 3.42%), con valores de $\Delta Ecmc$ muy similares entre dosis; sin embargo, su media es inferior a pH 6. Finalmente, el pH 5 muestra una eficacia media, pero es más baja que el pH 6.

Figura 14

Comparación de ΔEcmc por pH



Fuente: Propia

En la **Figura 14** se muestra la varianza del parámetro $\Delta Ecmc$ en función del pH final, para las dosificaciones de 50, 100, 200 y 400 mg/L de $Al_2(SO_4)_3$. Se identifica que las dosificaciones de 200 y 400 mg/L presentan el mayor cambio a un pH 6, alcanzando los valores más altos del

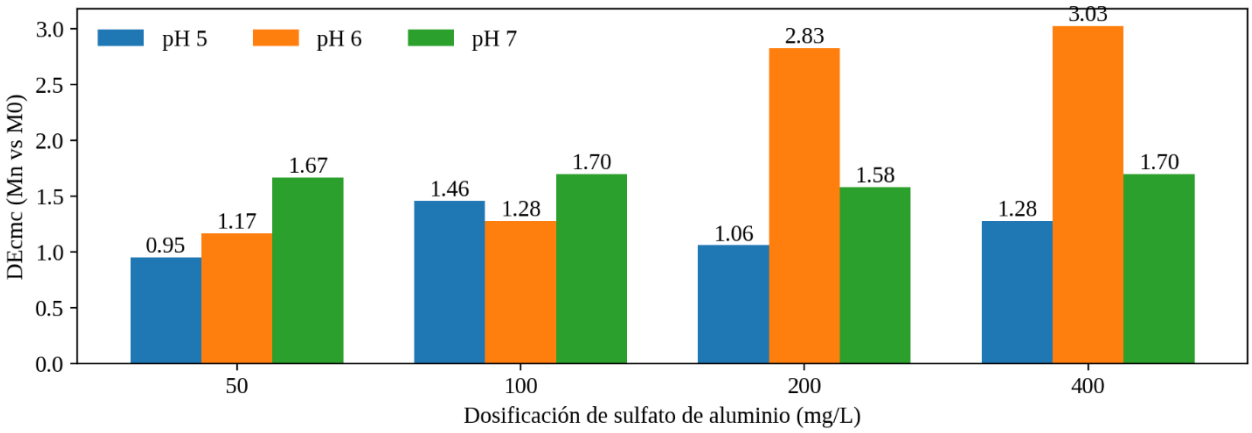
$\Delta Ecmc$, lo que indica una mayor diferencia cromática respecto a la muestra sin tratar. En contraste, con 50 mg/L se observa un aumento gradual desde un pH 5 hasta el pH7, reflejando un efecto más moderado del tratamiento. Por otro lado, la dosis de 100 mg/L, el comportamiento es menos uniforme, debido a que el valor disminuye ligeramente en un pH 6 y posteriormente aumenta en un pH 7. Finalmente, a un pH 7 los valores de $\Delta Ecmc$ tienden a aproximarse entre las dosificaciones, lo que sugiere una respuesta más estable y homogénea, aunque sin alcanzar el máximo desempeño observado en un pH 6 a 200 y 400 mg/L.

Análisis del coeficiente de variación en el cambio de color según dosificación y pH

Para evaluar el efecto de manera combinada la influencia del pH y la dosificación del sulfato de aluminio sobre la remoción del color, se organizó la información en una matriz de valores de $\Delta Ecmc$ por cada muestra experimental. La **Figura 15** permite comparar directamente el cambio cromático entre tratamientos e identificar posibles interacciones entre ambas variables.

Figura 15

Gráfico de barras ΔEcmc por pH y dosificación



Fuente: Propia

La figura confirma que el máximo cambio perceptible visualmente se alcanza en pH 6 con 400 mg/L ($\Delta Ecmc = 3.03$) y 200 mg/L ($\Delta Ecmc = 2.83$), indicando mayor remoción frente a M_0. Además, se observa que en un pH 6 existe un salto marcado al pasar de 100 mg/L a 200 mg/L – 400 mg/L, lo que explica su alto CV por pH. En cambio, pH 7 presenta valores muy similares entre dosis, lo que sugiere un régimen más estable, pero con menor potencial máximo que pH 6. Desde

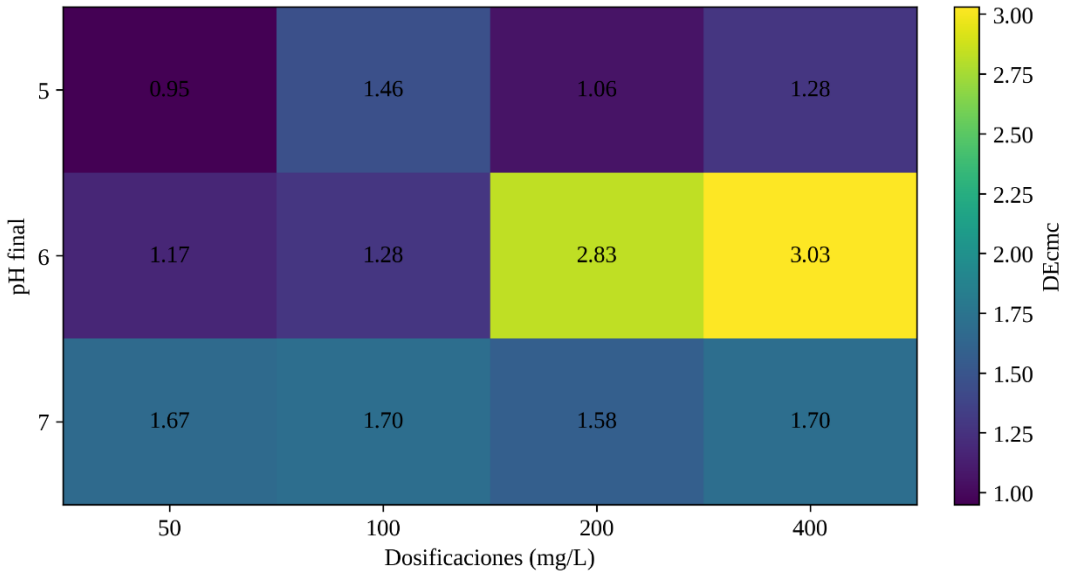
la perspectiva de las dosis de 200 mg/L y 400 mg/L, muestran CV% altos, es decir, su eficiencia depende en gran medida del pH. Mientras que 100 mg/L se comporta más regularmente a través de pH.

Dosificación óptima para el tratamiento de efluentes de tintura de fibras proteínicas

Los resultados muestran que la remoción visual del color $\Delta Ecmc$ está determinada por la interacción entre pH y dosificación. En la **Figura 16** muestra que a un pH 6 los valores de $\Delta Ecmc$ son más altos. Con 200 y 400 mg/L (2.83 y 3.03), indica un mayor cambio cromático respecto a la muestra sin tratar (M0). Eso significa que hay más cambio de color y mejor remoción visual en esas condiciones. En contraste, a un pH 7 los valores se mantienen en un rango intermedio y relativamente uniforme, reflejando un comportamiento más estable, aunque sin alcanzar los máximos obtenidos a un pH 6. No obstante, en un pH 5 se obtuvo los valores más bajos, asociándose a una remoción comparativamente menor.

Figura 16

Comparación entre dosificaciones



Fuente: Propia

La distribución general de los resultados confirma que la remoción visual del color no es homogénea entre las dosificaciones evaluadas (50, 100, 200, 400 mg/L) y que existe una

combinación específica que maximiza el cambio. En este contexto, la condición con un pH 6 con 200 – 400 mg/L reúne los valores más altos de $\Delta Ecmc$, por lo que es identificada con el rango operativo más favorable para incrementar la remoción visual del color del efluente tratado. En consecuencia, se refuerza que el desempeño del sulfato de aluminio no depende únicamente de aumentar la dosificación, sino de trabajar en un rango de pH que favorezca el proceso de coagulación-floculación.

A partir de la distribución general de los resultados obtenidos, se determina que a un pH 6 se obtiene un escenario operativo ideal para optimizar el proceso de coagulación-floculación en comparación con las otras condiciones de acidez evaluadas. En lo que respecta a la dosificación, se evidencia que a mayor concentración de $Al_2(SO_4)_3$ se obtiene un incremento en la remoción de color; no obstante, al emplear dosis elevadas la eficiencia del coagulante tiende a estabilizarse. Puesto que el rendimiento alcanzado con 400 mg/L no manifiesta una diferencia drástica ni significativa frente al obtenido con 200 mg/L, se establece esta última concentración como la alternativa más óptima. Considerando las condiciones técnicas y económicas, se establece que el tratamiento con un pH 6 y con una dosificación de 200 mg/L de $Al_2(SO_4)_3$ representa una condición optima de operación, puesto que maximiza la rentabilidad del proceso, y que garantiza el uso eficiente de los recursos sin comprometer el desempeño del tratamiento.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se estableció una base teórica sólida mediante la recopilación de información técnica sobre el proceso de coagulación-floculación, identificando al sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3$) como un agente desestabilizador eficaz para el tratamiento de efluentes provenientes de tintura con colorantes ácidos de fibras proteínicas. La revisión bibliográfica permitió comprender que la eficiencia de este coagulante se debe a su capacidad para neutraliza las cargas negativas de los coloides presentes en el agua residual de tintura. Además, se estableció que tanto el potencial hidrógeno (pH) como la dosificación del sulfato de aluminio son determinantes para la formación de flóculos sedimentables y mejoren la claridad del agua tratada. Con esta base teórica se justificó la selección del método fisicoquímico como una alternativa económica y viable para los microemprendimientos textiles.
- La caracterización fisicoquímica inicial de la muestra permitió tener un punto de partida cuantitativa, registrando un pH inicial de 4 y los valores de la concentración de color presente en la muestra base correspondientes a claridad (L*) de 33.68, coordenada de a* de -1.21 y coordenada de b* de -2.71 en el efluente de tintura antes del tratamiento. Debido a la precisión de la medición realizada a la muestra sin tratamiento, fue posible fijar un estándar de referencia como un índice $\Delta Ecmc$ de 0.00, sirviendo como base analítica para determinar la eficiencia de remoción alcanzada por el proceso de coagulación-floculación con sulfato de aluminio.
- A partir de los resultados obtenidos durante la fase experimental, permitió identificar los tres mejores tratamientos en función de la interacción del pH y la dosificación del $Al_2(SO_4)_3$. La máxima eficiencia de remoción de color se obtuvo con un pH 6 con una dosificación de 400 mg/L con un $\Delta Ecmc$ de 3.03. La segunda mejor reacción se registró igualmente a un pH 6 pero con la dosificación de 200mg/L, donde se logró una remoción altamente competitiva con un $\Delta Ecmc$ de

2.83. Finalmente, se identificó de manera constante a un pH 7, el cual si bien mantuvo lecturas estables de remoción de color, donde se observo una remoción inferior a los realizados con un pH 6. En contraste, las pruebas realizadas a un pH 5 evidenciaron la menor efectividad operativa del $Al_2(SO_4)_3$.

- Se concluye que el pH 6 es el parámetro crítico del tratamiento con sulfato de aluminio, dado que proporciona una respuesta de remoción de color superior en comparación con los demás valores de pH estudiados. Si bien la aplicación de 400 mg/L de sulfato de aluminio permitió obtener la máxima eficiencia de reducción de presencia de colorante, sin embargo, con respecto a la dosificación de 200 mg/L no muestra una diferencia drástica ni significativa, evidenciando un comportamiento de saturación del proceso. En este contexto, la dosificación de 200 mg/L trabajando aun pH 6 constituye la alternativa más conveniente desde una perspectiva técnico-económica, al permitir el uso eficiente del coagulante sin afectar la calidad de la remoción del color presente en el efluente.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda estudiar en futuras investigaciones el comportamiento de coagulantes alternativos o de origen orgánico aplicados a efluentes de fibras proteínicas, dado que esto permitirá identificar mecanismos de remoción. El sulfato de aluminio demostró una alta efectividad bajo condiciones controladas de acidez. La exploración de nuevas tecnologías facilitará la selección de procesos aún más eficientes para el sector textil. En este contexto, los ensayos que se realizaron también contribuirán a elaborar nuevas estrategias. Con las cuales se promuevan una gestión ambiental sostenible y alineada con las exigencias normativas actuales.
- Se recomienda ampliar el espectro experimental mediante la recolección de efluentes provenientes de diferentes empresas o emprendimientos dedicados a la tintura de fibras proteínicas de la región, aplicando una homologación de criterios normativos para el transporte y caracterización. Dado que la composición del agua residual textil está sujeta a recetas específicas de tintura dependiendo de cada empresa, la comparación de resultados entre muestras de diverso origen fortalecerá

la repetitividad técnica del modelo de optimización de pH planteado. De igual manera, este enfoque multi-planta contribuirá notablemente a consolidar bases de datos comparativas que sustenten soluciones colectivas y sostenibles para la industria

- Se recomienda ampliar la caracterización fisicoquímica de los efluentes con el análisis de parámetros adicionales como turbidez, sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO). La incorporación de los indicadores permitirá realizar una evaluación más integral de la calidad del agua residual y de la efectividad del tratamiento con sulfato de aluminio aplicado. Asimismo, permitirá la comparación de resultados obtenidos con normativas ambientales vigentes y aportará información para optimizar los procesos de tratamientos antes de la descarga del efluente textil.
- Para futuras investigaciones, se sugiere profundizar los ensayos hacia un ajuste fino del pH del efluente, evaluando variaciones específicas en un rango de 6, 6.2, 6.4, 6.6 y 6.8 de manera conjunta con concentraciones de sulfato de aluminio situadas entre 200 y 400 mg/L. este nivel de precisión permitirá identificar rigurosamente el punto de saturación y el límite de eficiencia del coagulante, asegurando que el incremento de las dosis se observe en una mejora real de la remoción de color y optimización de la relación costo-beneficio para el efluente de la tintura de fibras proteínicas.
- Se recomienda realizar un estudio económico enfocado en la estimación de los costos operativos a nivel de planta, mediante la realización de una matriz costo-beneficio. Por medio del análisis se deberá contrastar de manera cuantitativa el ahorro económico derivado de utilizar la dosis de 200 mg/L frente a la de 400 mg/L, e integrar costos adicionales del sistema real como el gasto energético de agitación y el costo de agente regulador del pH en el afluente, demostrando de manera matemática la rentabilidad del tratamiento en el efluente de la planta textil.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahmed, J., Thakur, A., & Goyal, A. (2022). Chapter 1: Industrial wastewater and it´s toxic effects. *Royal Society of Chemistry*. www.rsc.org

Al-Tohamy, R., Ali, S. S., Li, F., Okasha, K. M., Mahmoud, Y. A. G., Elsamahy, T., Jiao, H., Fu, Y., & Sun, J. (2022). A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. In *Ecotoxicology and Environmental Safety* (Vol. 231). Academic Press. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113160

Aris Industrial S. A. (2025). *Ficha técnica del sulfato de aluminio*.

Avalos, M. (2023). *Eficiencia de la cáscara de naranja "citrus sinensis" frente al sulfato de aluminio para la remoción de la materia orgánica en aguas residuales domesticas de la PTAR TABOADA, Callao* [Universidad Nacional Federico Villareal]. https://secure.urkund.com/old/view/138279697-247296-

Betancourt, D., Parra, N., Pilamunga, K., & Suarez, G. (2025). Pirámides de tintura textil en lana para su aplicación en productos indumentarios. *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS, 7*, 347–359.

Biomed Instruments. (2025, May). *Agitador digital magnético de 10L*. https://www.biomed.com.ec/products/agitador-digital-magnetico-10l-100-1500-rpm-ec-lab?_pos=6&_sid=d4be54504&_ss=r

Boeckel. (2021). *Manual de instrucciones*.

Chugá, V., Naranjo, M., Godoy, O., & Basantes, A. (2025). Sustainable Treatments in Denim Fabric: A Systematic Review of Environmental Impact. *Sustainability*, *17*(23). https://doi.org/10.3390/su172310469

Constitución de La Republica Del Ecuador, 449 Registro Oficial 14 (2008). www.lexis.com.ec

Datacolor. (2022). *Distancias en color, metamerismo y ecuaciones practicas sobre color* (Datacolor, Ed.; Gestión del color, Vol. 4).

Distribuidora de químicos industriales S. A. (2020). *Sulfato de aluminio*. www.dqisa.com

Dong, D., Wu, M., Yang, Y., Jiao, Y., Wang, B., & Shao, M. (2025). Textile printing and dyeing wastewater: A comprehensive profiling and in-depth examination of sustainable treatment strategies. *Chemistry Europe*, *10*(22). https://doi.org/https://doi.org/10.1002/slct.202405659

Donkadokula, N. Y., Kola, A. K., Naz, I., & Saroj, D. (2020). A review on advanced physico-chemical and biological textile dye wastewater treatment techniques. In *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* (Vol. 19, Number 3, pp. 543–560). Springer. https://doi.org/10.1007/s11157-020-09543-z

Dotto, G., Rosa, G., Moraes, M., Weska, R., & Pinto, L. (2013). Treatment of chitin effluents by coagulation–flocculation with chitin and aluminum sulfate. *Environmental Chemical Engineering*, *1*(1–2). https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343713000092

Dutta, P. (2022). Effects of textile dyeing effluent on the environment and its treatment: A review. *Engineering and Applied Science Letters*, *5*(1), 1–17. https://doi.org/10.30538/psrp-easl2022.0080

Fernández, Y., & Ruiz, C. (2020). Wastewater treatment by applying aluminum sulfato and natural tamarind biopolymer (Tamarindus indica). *Revista de Investigación: Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, *6*(2), 28–34. https://revistas.upeu.edu.pe/index.php/ri_ctd/index

Flores, C., & Flores, K. (2021). Pruebas para comprobar la normalidad de datos en procesos productivos: Anderson - Darling, Ryan - Joiner, Shapiro - Wilk y Kolmogórov - Smirnov-JOINER, SHAPIRO-WILK Y KOLMOGÓROV-SMIRNOV. *Societas*, *23*(2), 83–106. https://doi.org/10.48204/NH

Gallego, C., & Rubio, A. (2022). Remoción de colorantes en aguas procedentes de la industria textil mediante el uso de bicarbonato. *Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry*, *79*(576). https://doi.org/https://doi.org/10.55815/401287

Gamas, J. (2021). *Efecto de la poliacrilamida en el proceso de coagulación, para la remoción de nutrientes y biomasa de microalgas en el agua del lago de Amatitlán, utilizando sulfato de*

aluminio como coagulante. [Universidad de San Carlos de Guatemala]. http://www.repositorio.usac.edu.gt/16192/1/Jorge%20Antonio%20Gamas%20Lara.pdf

García, J., & Rivera, L. (2021). *Evaluación de almidón de achín como coadyuvante del sulfato de aluminio para la remoción de turbidez en aguas del río magdalena.* Universidad Católica de Colombia.

Giacomni, F., Menegazzo, M. A. B., da Silva, M. G., da Silva, A. B., & de Barros, M. A. S. D. (2017). Importância da determinação do ponto de carga zero como característica de tingimento de fibras proteicas. *Revista Materia*, *22*(2). https://doi.org/10.1590/S1517-707620170002.0159

Google Maps. (2024). *Mapa de google earth* . https://www.google.com/maps/place/Ingenieria+Textil+UTN/@0.3785699,-78.1224875,17.16z/data=!4m6!3m5!1s0x8e2a3b4573ee6185:0xacccd8e286efad45!8m2!3d0.3779989!4d-78.1233653!16s%2Fg%2F11gcf02kzn?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MTAyNy4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D

Google Maps. (2025). *Mapa de Google earth*. https://www.google.com/maps/@0.3772005,-78.1651251,11.95z?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MTAyNy4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D

Haro, A. F., Chisag, E. R., Ruiz, J. P., & Caicedo, J. E. (2024). Tipos y clasificación de las investigaciones. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, *5*(2). https://doi.org/10.56712/latam.v5i2.1927

Haßler, G. (2009). El método analítico en la obra de Andrés Bello. *Revista Argentina de Historiografía Lingüística*, *1*, 19–34. www.rahl.com.ar

Hemashenpagam, N., & Selvajeyanthi, S. (2023). Textile Dyes and Their Effect on Human Beings. In A. Ahmad, M. Jawaid, M. N. Mohamad Ibrahim, A. A. Yaqoob, & M. B. Alshammari (Eds.), *Nanohybrid Materials for Treatment of Textiles Dyes* (pp. 41–60). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-99-3901-5_3

i5 X - Rite. (2013). *Espectrofotómetro Color i5 X - Rite*.

Liu, Q. (2020). Pollution and treatment of dye waste-water. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *514*(5). https://doi.org/10.1088/1755-1315/514/5/052001

Lopera, J., Ramírez, C., Zuluaga, M., & Ortiz, J. (2010). El método analítico como método natural. *Critical Journal of Social and Juridical Sciences*, *25*(1).

Mercè, M., & Vallvé, V. (2015). *Eliminación del color de las aguas residuales procedentes de la tintura con colorantes reactivos* [Universitat Politécnica de Catalunya]. https://doi.org/10.5821/dissertation-2117-95783

Moreno, A. (2023). *Estudio de la viabilidad del separador ciclónico para la clasificación de las fibras textiles procedentes del reciclaje mecánico* [Universitat Politécnica de Catalunya]. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/398322/TFE_Moreno_Izquierdo_Ariadna?sequence=2&isAllowed=y

My Huong, D., Siong, W., Show, P., Lin, Y.-L., Chiu, C.-Y., Tsai, S.-L., & Chang, YU. K. (2020). Removal of cationic dye waste by nanofiber membrane immobilized with waste proteins. *International Journal of Biological Macromolecules*, *164*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.020

Nahiun, K., Sarker, B., Keya, K., Mahir, F., Shahida, S., & Khan, R. (2021). A review on the methods of industrial waste water treatment. *Scientific Review*, (73), 20–31. https://doi.org/10.32861/sr.73.20.31

NTE INEN 2 176. (1998). NTE INEN 2 176:1998 Agua. Calidad del agua. Muestreo. Técnicas de muestreo. In *INEN*.

NTE INEN 2169. (2013). NTE INEN 2169:2013 Agua. Calidad del agua. Muestreo. Manejo y conservación de muestras. In *INEN*.

Núñez, M., Moreno, M., Moscoso, N., & Velasteguí, E. (2023). Toxicidad de aguas residuales textiles en Ambato: Evaluación del conocimiento de decisores. *Revista Universidad y Sociedad*, *15*(2), 306–315. http://scielo.sld.cu/pdf/rus/v15n2/2218-3620-rus-15-02-306.pdf

Orellana, J. (2020). *Estado del arte sobre la ocurrencia y riesgos de los colorantes en efluentes de fábricas textiles y su remoción a través de fotocatálisis heterogénea.* Universidad de Cuenca.

Ortega, A., & Sánchez, N. (2021). Tratamientos avanzados para la potabilización de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*.

Ospina, D. (2020). Ficha técnica del sulfato de aluminio. In *Distribuidora de químicos industriales*.

Potosí, M. (2023). *Efecto devoré sobre muestras de tela jersey Pes/Co 65/35 utilizando pasta madre ácida como agente destructor de algodón mediante estampación directa.* Universidad Técnica del Norte.

Ramírez, J. C. (2023). Tratamiento de aguas residuales y problemáticas ambientales del sector textil en Colombia: una revisión. *Informador Técnico, ISSN 0122-056X, ISSN-e 2256-5035, Vol. 87, Nº. 1, 2023, Págs. 82-106*, *87*(1), 82–106. https://doi.org/10.23850/22565035.5304

Rivera, D. (2020). *Efecto de la cáscara de Solanum tuberosum y sulfato de aluminio, en la disminución de la turbidez en el tratamiento de aguas residuales*. Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur.

Rodríguez, Y. (2020). *Metodología de la investigación* (A. Rodríguez, Ed.). Klik soluciones educativas, S. S. de C. V.

Shamey, R., & Sawatwarakul, W. (2014). Innovative critical solutions in the dyeing of protein textile materials. *Textile Progress*, *46*(4), 323–450. https://doi.org/https://doi.org/10.1080/00405167.2014.980639

Universidad Técnica del Norte. (2022). *Convocatoria Investiga UTN 2022*. https://www.utn.edu.ec/investiga2022/

Vaca, M., Hidalgo, L., Vaca, M., & Núñez, K. (2020). Application of different natural dyes to obtain organic sheep wool yarn. *Polo Del Conocimiento*, *5*(08), 1095–1113. https://doi.org/10.23857/pc.v5i8.1646

Verma, R., Sankhla, M., Rathod, N., Sonone, S., Parihar, K., & Singh, G. (2021). Eradication of fatal textile industrial dyes by wastewater treatment. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, *12*(1), 567–587. https://doi.org/10.33263/briac121.567587

Vilaseca, M., López, V., Gutiérrez, C., & Crespi, M. (2015). Métodos de eliminación del color en efluentes de tintura textil. *Revista de Química e Ingeniería Textil*, 22–26.

Villanueva, F. (2022). *Metodología de la investigación* (H. Guerrero, Ed.). Klik soluciones educativas, S. S. de C. V.

7. ANEXOS

Anexo 1

Ficha técnica del $Al_2 (SO_4)_3$

SULFATO DE ALUMINIO
GRANULADO TIPO A PANTERA

Un producto de: ARISagua

FICHA TÉCNICA

Nombre comercial	Sulfato de Aluminio Granulado Tipo A Pantera
Peso molecular	594.14 g/mol.
Formula química	$AL_2(SO_4)_3.14H_2O$
Apariencia	Cristales color blanco



Imagen referencial.

COMPOSICIÓN QUÍMICA

PARÁMETROS	ESPECIFICACIÓN	MÉTODO
Sulfato de Aluminio, %	57.0	Q-M-LSAL-02

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS

PARÁMETROS	ESPECIFICACIÓN	MÉTODO
Aluminio Total Soluble, Al_2O_3, %	Mín. 17.0	Q-M-LSAL-02
Basicidad, Al_2O_3, %	Máx. 0.60	Q-M-LSAL-01
Hierro Total Soluble, Fe_2O_3, %	Máx. 0.05	Q-M-LSAL-04
Insolubles, %	Máx. 0.20	Q-M-LSAL-05
Malla 6, % Pasante	Mín. 100	Q-M-LSAL-03
Malla 10, % Pasante	Mín. 60	Q-M-LSAL-03

Cumple el DS 031-2010-SA con registro Sanitario N°RSDAN7616.
Cumple con la Norma Técnica Peruana NTP 311.095 Revisión 1999 y la norma internacional ANSI/ AWWA B403-93 para productos químicos usados en el tratamiento del agua.

USOS

- Coagulante principal en el tratamiento de agua para consumo humano para remover los contaminantes coloidales y en la mayoría de los procesos de separación de sólidos.
- En la industria textil como mordiente, afirmante, anti-transpirante, entre otros.

PRESENTACIONES

Bolsas de 25 Kg y 50 Kg, Big Bag de 500 Kg, 800 Kg, 1000 Kg y 1250 Kg.

CONDICIONES DE USO Y ALMACENAJE


Almacenar sobre pallets


Mantener en lugares secos y bajo techo


Proteger del sol


No comer, beber, ni fumar.


Mantener lejos de niños y animales

Aris Industrial S.A. garantiza que al momento de emitir esta hoja técnica el producto cumple con la especificación declarada. Es responsabilidad del comprador determinar que el producto cumple con los requisitos para su uso, incluyendo mediante la realización de pruebas de aplicación, así como de tomar todas las medidas de seguridad razonables.

Anexo 2

Acid RB

Quimicolours S.A.

FICHA TECNICA

CONTROLLER ACID RB

Carácter Iónico	: Iónico ligeramente aniónico.
Constitución	: Mezcla sinergética de ácidos y compuestos orgánicos de alto peso molecular

FUNCIONES Y CAMPOS DE EMPLEO	El **CONTROLLER ACID RB,** es un producto fuertemente ácido, con características débilmente secuestrantes, buffer y enmascarador de bicarbonatos. Debido a su alto poder acidulante, se utiliza en los procesos químicos textiles donde se desee regular el PH o trabajar en medio ácido, como la tintura de colorantes dispersos, reactivos y otros. Es también altamente eficiente, en todos los procesos de neutralización ácido – base, como son los post – tratamientos en descrude, blanqueo, mercerizado y lavado de tinturas, que requieran de esta condición. El **CONTROLLER ACID RB,** refuerza la acción de los secuestrantes buffers y eliminadores de bicarbonatos, colaborando en la igualación y reproducibilidad de las tinturas de fibras poliestéricas, celulosicas, viscosa, poliamida, acrílico y lana.

CARACTERISTICAS	**Aspecto** : Líquido incoloro **Estabilidad** : Excelente en medio ácido y básico fuerte, estable a los agentes de reducción y oxidación en las concentraciones usuales. **Solubilidad** : Soluble en todas las proporciones **Presentación** : Tambores de 100 y 200 kilos

Anexo 3

Álcali

FICHA TÉCNICA DE PRODUCTO
MARVACOL ATP HSP

Revisado/Aprobado por: Investigación y Desarrollo

Última revisión: 02/04/2018

COLORQUIMICA

DESCRIPCION GENERAL DEL PRODUCTO

MARVACOL® ATP HSP es un álcali especialmente diseñado para la tintura de colorantes reactivos. Reemplaza con múltiples ventajas los álcalis convencionales tales como soda cáustica, carbonato de sodio y bicarbonato de sodio en la tintura de dichos colorantes. Su efecto bufferizante permite un mayor control del pH, especialmente en máquinas de circulación con bajas relaciones de baño.

MARVACOL® ATP HSP tiene un poder alcalinizante superior, que permite obtener pHs de tintura altos a bajas dosificaciones de producto.

MARVACOL® ATP HSP esta exento de productos controlados por el Consejo Nacional de Estupefacientes de la república de Colombia en su resolución 01 de 2015.

PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS

Propiedad	Unidad	Mínimo	Máximo
Aspecto	Líquido transparente		
Estabilidad al frio	BUENA		
pH (solución acuosa 5 g/l)	Adim	12	13

Para aclaración de estas especificaciones y/o mayores datos técnicos favor contactar con nuestra área técnica y/o comercial.

APLICACIÓN Y ASPECTOS GENERALES

MARVACOL® ATP HSP, es un producto de fácil disolución, ideal para equipos con dosificación automática. Se recomienda adicionar el producto en tres partes.

En su uso para la tintura de colorantes reactivos se recomienda fijar el pH inicial entre 5 y 7 para evitar fijación prematura de colorante. De igual manera, se sugiere medir el pH durante las diferentes etapas del proceso, para garantizar que el pH de tintura sea óptimo.

Recomendaciones de aplicación:

Las dosificaciones de álcali y sal deben ajustarse según la concentración de colorante usado, y verificando siempre que el pH de tintura se encuentre alrededor de 10.5, a nivel orientativo se recomienda usar:

Concentración de colorante (%)	Sal común (g/l)	Marvacol ATP HSP (g/l)
0.0 – 0.5	30	1.8
0.5 – 1.0	40	2.2
1.0 – 2.0	50	2.6
2.0 – 3.0	60	3
3.0 – 4.0	70	3.4
4.0 - 5	80	3.7
5.0 - 6	90	4
> 6	100	4.3

La temperatura de tintura se debe ajustar según el colorante usado. Para colorantes reactivos fríos de la gama bifuncional / vinilsulfónico / polifuncional NOVACTIVE ®: 55 - 65 °C. Para colorantes reactivos calientes NOVACTIVE ® C: 80 °C.

Anexo 4

Recolección de la muestra del agua residual



Anexo 5

Tratamiento del agua residual



Anexo 6

Espectrofotometría



Anexo 7

Resultados de espectrofotometría

Tolerances:	DL* tol	Da* tol	Db* tol	DC* tol	DH* tol	P/F tol	Margin	l:c
D65-10	1.55	0.70	0.70	0.75	0.70	1.00	0.10	2.

Standard Name:	L*	a*	b*	C*	hº
S. A M0	33.68	-1.21	-2.71	2.97	245.95

Trial Name	DL*	Da*	Db*	DC*	DH*	DEcmc	DE*
S. A M1	1.50 L	-0.00	1.31 Y	-1.11 D	-0.69 G	1.84	1.99
S. A M2	2.51 L	-0.07 G	-0.08 B	0.10 B	-0.03 G	1.46	2.52
S. A M3	1.39 L	-0.02 G	0.22 Y	-0.19 D	-0.11 G	0.85	1.41
S. A M4	2.04 L	0.04 R	0.40 Y	-0.37 D	-0.14 G	1.28	2.08
S. A M5	-1.03 D	0.01	1.07 Y	-0.94 D	-0.52 G	1.46	1.49
S. A M6	0.30 L	-0.05 G	1.02 Y	-0.86 D	-0.55 G	1.28	1.06
S. A M7	0.59 L	-0.06 G	0.98 Y	-0.82 D	-0.54 G	1.26	1.14
S. A M8	1.44 L	-0.20 G	-0.02	0.10 B	-0.17 G	0.87	1.46
S. A M9	1.73 L	-0.17 G	1.05 Y	-0.81 D	-0.69 G	1.67	2.03
S. A M10	1.70 L	-0.17 G	1.10 Y	-0.84 D	-0.72 G	1.70	2.03
S. A M11	1.39 L	-0.11 G	1.08 Y	-0.87 D	-0.65 G	1.58	1.76
S. A M12	5.78 L	-0.27 G	-0.48 B	0.55 B	-0.05 G	3.40	5.80

Anexo 8

Pruebas repetidas

Tolerances:	DL* tol	Da* tol	Db* tol	DC* tol	DH* tol	P/F tol	Margin	I:
D65-10	1.65	0.65	0.70	0.70	0.65	1.00	0.10	

Standard Name:	L*	a*	b*	C*	h°
M. 0	37.66	-1.05	-1.93	2.20	241.56

Trial Name	DEcmc	DE*	GS Change	DL*	Da*	Db*	DC*
M. 5 - 1	1.17	1.88	4	-1.82 D	-0.14 G	0.47 Y	-0.31 D
M. 5 - 2	0.83	0.99	4.5	-0.84 D	-0.06 G	0.53 Y	-0.41 D
M. 7 - 1	2.83	3.29	3	2.71 L	-0.47 G	-1.81 B	1.85 B
M. 7 - 2	1.19	1.97	4	-1.91 D	-0.08 G	0.45 Y	-0.33 D
M 8 - 1	3.03	3.52	3	2.89 L	-0.48 G	-1.95 B	1.98 B

Tolerances:	DL* tol	Da* tol	Db* tol	DC* tol	DH* tol	P/F tol	Margin	I:
D65-10	1.65	0.65	0.70	0.70	0.65	1.00	0.10	

Standard Name:	L*	a*	b*	C*	h°
M. 0	37.41	-1.08	-1.93	2.21	240.91

Trial Name	DEcmc	DE*	GS Change	DL*	Da*	Db*	DC*
M. 1-1	0.95	1.55	4	-1.51 D	-0.01	0.37 Y	-0.31 D
M. 1- 2	1.25	2.23	3.5	-2.21 D	-0.07 G	0.26 Y	-0.18 D
M. 1-3	0.35	0.42	4.5	-0.36 D	-0.08 G	-0.21 B	0.22 B
M. 3 - 1	1.06	1.75	4	-1.71 D	0.01	0.41 Y	-0.35 D
M. 3 - 2	0.99	1.57	4	-1.51 D	-0.06 G	0.42 Y	-0.32 D
M. 3 - 3	0.52	0.79	4.5	-0.75 D	-0.10 G	-0.23 B	0.25 B

Tolerances:	DL* tol	Da* tol	Db* tol	DC* tol	DH* tol	P/F tol	Margin	I:
D65-10	1.65	0.65	0.70	0.70	0.65	1.00	0.10	

Standard Name:	L*	a*	b*	C*	h°
M. 0	37.45	-1.10	-1.95	2.24	240.67

Trial Name	DE*	GS Change	DEcmc	DL*	Da*	Db*	DC*
M. 9	3.60	3	3.05	3.00 L	-0.44 G	-1.95 B	1.96 B
M 10	0.42	4.5	0.53	0.07 L	-0.26 G	-0.32 B	0.41 B
M 11	5.78	2.5	4.72	4.93 L	-0.55 G	-2.97 B	2.95 B
M 12	2.35	3.5	1.70	2.14 L	-0.19 G	-0.95 B	0.93 B

Anexo 9

Certificado de uso de laboratório

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
LABORATORIO DE PROCESOS TEXTILES DE LA CARRERA DE TEXTILES

IBARRA - ECUADOR
Carrera de Textiles
Ingeniería

Ibarra, 23 de junio del 2026

CERTIFICADO DE LABORATORIO

Yo, **MSc. José Rafael Posso Pasquel,** en calidad de responsable técnico del laboratorio de procesos textiles de la Carrera de Textiles:

CERTIFICO

Que la señorita **Fernanda Abigail Cuasquer Guerrero,** portadora de la cédula de ciudadanía N° **0401979760**, ha realizado ensayos de laboratorio referentes al Trabajo de Titulación, con el tema: **"EFECTIVIDAD DEL SULFATO DE ALUMINIO A DIFERENTE PH EN LA ELIMINACIÓN DEL COLOR DE LAS AGUAS RESIDUALES DE TINTURA DE FIBRAS PROTEÍNICAS"**, los equipos utilizados en el laboratorio fueron:

- **Balanza analítica**
- **Vasos de precipitación**
- **Espectrofotómetro Color I5 X–Rite**
- **Agitador digital magnético**

Además, se le ayudó con las asesorías necesarias para cumplir a cabalidad el proceso.

Atentamente:

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
JOSE RAFAEL POSSO PASQUEL

MSc. JOSÉ POSSO.
RESPONSABLE TÉCNICO DEL LABORATORIO DE PROCESOS TEXTILES – CTEX