



ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

LA HARINA DE HABA (Vicia faba) COMO AGENTE COAGULANTE Y
FLOCULANTE NATURAL PARA DEGRADAR LA TURBIDEZ DEL AGUA

Línea de investigación:
Tecnologías para residuos y pasivos ambientales. Biorremediación

Tesis para optar el grado académico de Doctor en Ingeniería Ambiental

Autor

Castillo Peña, Alcides

Asesor

Marín Machuca, Olegario

ORCID: 0000-0002-0515-5875

Jurado

Zambrano Cabanillas, Abel Walter

Naupay Vega, Marlitt Florinda

Alburquerque Yataco, Celso Alejandro

Lima - Perú

2025

LA HARINA DE HABA (Vicia faba) COMO AGENTE COAGULANTE Y FLOCULANTE NATURAL PARA DEGRADAR LA TURBIDEZ DEL AGUA

INFORME DE ORIGINALIDAD

23%

INDICE DE SIMILITUD

22%

FUENTES DE INTERNET

7%

PUBLICACIONES

6%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

hdl.handle.net

Fuente de Internet

5%

2

www.coursehero.com

Fuente de Internet

1%

3

repositorio.unsaac.edu.pe

Fuente de Internet

1%

4

sired.udenar.edu.co

Fuente de Internet

<1%

5

www.researchgate.net

Fuente de Internet

<1%

6

cybertesis.uni.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

7

repositorio.utc.edu.ec

Fuente de Internet

<1%

8

html.pdfcookie.com

Fuente de Internet

<1%

9

bdigital.unal.edu.co

Fuente de Internet

<1%

10

www.scielo.org.co

Fuente de Internet

<1%

11

dspace.ucuenca.edu.ec

Fuente de Internet

<1%

repositorio.lamolina.edu.pe



ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

**LA HARINA DE HABA (*Vicia faba*) COMO AGENTE COAGULANTE Y
FLOCULANTE NATURAL PARA DEGRADAR LA TURBIDEZ DEL AGUA**

Línea de investigación:

Tecnologías para residuos y pasivos ambientales. Biorremediación

Tesis para optar el grado académico de
Doctor en Ingeniería Ambiental

Autor

Castillo Peña, Alcides

Asesor

Marín Machuca, Olegario
ORCID: 0000-0002-0515-5875

Jurado

Zambrano Cabanillas, Abel Walter
Naupay Vega, Marlitt Florinda
Alburquerque Yataco, Celso Alejandro

Lima – Perú

2025

DEDICATORIA

A la memoria de mis queridos padres,
Genaro y **Basilia**, quienes transformaron la
escasez en abundancia y me dieron la
oportunidad de soñar con un mundo mejor.

AGRADECIMIENTO

A mis amados hijos, Alexis, Karina, José Carlos y Antonio por su amor, comprensión y acompañamiento permanente.

Mi gratitud y agradecimiento al **Dr. Olegario Marín Machuca**, por su invaluable apoyo, como guía y consejero en el desarrollo y culminación de esta investigación, en su condición de asesor

INDICE

Resumen	xiv
Abstract	xv
I. Introducción	
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Descripción del problema	10
1.3. Formulación del problema	
1.3.1. Problema general	13
1.3.2. Problemas específicos	13
1.4. Antecedentes	
1.4.1. Antecedentes internacionales	14
1.4.2. Antecedentes nacionales	19
1.5. Justificación de la investigación	20
1.6. Limitaciones de la investigación	22
1.7. Objetivos	
1.7.1. Objetivo general	23
1.7.2. Objetivos específicos	23
1.8. Hipótesis	
1.8.1. Hipótesis general	23
1.8.2. Hipótesis específicas	24
II. Marco teórico	
2.1. Bases teóricas	25
2.1.1. El agua	25
2.1.2. El Agua potable	27

2.1.3. Impurezas en las fuentes de aguas superficiales	29
2.1.4. El agua turbia	30
2.1.5. La turbiedad del agua	31
2.1.6. Las partículas coloidales en el agua	34
2.1.7. El color del agua	35
2.1.8. Coagulantes de la turbidez del agua	36
– Coagulantes inorgánicos	37
– Coagulantes orgánicos	38
– Coagulación y floculación de los coloides del agua.	38
2.1.9. Coagulación, floculación y sedimentación	41
2.1.9. Coagulación	41
2.1.9.2. Sedimentación	42
2.1.9.3 Solución coagulante	42
2.1.10. Degradación de la turbidez del agua	43
2.1.10.1. Floculación y flóculos	43
2.1.10.2 Sedimentación de flóculos	44
2.1.11. El haba (<i>Vicia faba</i> L.)	44
– Tipos de haba (<i>Vicia faba</i> L.)	45
2.1.12. Harina de haba	47
2.2. Marco conceptual	
– Potencial de hidrogeniones del agua (pH)	49
– Conductividad eléctrica del agua ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	49
– Coagulación	50
– Coagulantes	50
– Coagulantes/floculantes orgánicos sintéticos	51

– Coagulantes/floculantes inorgánicos	51
– Coagulantes/floculantes naturales	52
– Floculación	52
– Flóculo	52
– Sedimentación	52
– Desnutrición crónica	53
– Zona andina	53
– Planta de tratamiento de agua potable (PTAP)	53
– Prueba de jarras	53
– Lodos tóxicos con aluminio	54
– Disposición adecuada de lodos	55
– Cumplimiento de normas ambientales	55
– Trazas de aluminio en el cuerpo del agua	55
III. Método	
3.1. Tipo de investigación	57
– Población y muestra	57
3.2. Operacionalización de variables	58
3.3. Instrumentos	59
3.4. Insumos para la investigación	60
3.5. Procedimientos	61
3.6. Análisis de datos	63
IV. Resultados	
4.1. Pruebas cualitativas de coagulación rápida	64
4.1.1 Prueba cualitativa rápida con harina de haba tostada	64
4.1.2 Prueba cualitativa rápida con harina de haba cruda	65

4.1.3	Preparación de la solución coagulante y condiciones experimentales	66
4.1.3.1.	Preparación de la solución madre del coagulante/floculante	66
4.1.3.2	Dosificación por jarra de ensayo	66
4.2.	Primera prueba de Coagulación/floculación y sedimentación	67
4.2.1.	Carga y aforo de las jarras	68
4.2.2.	Coagulación	69
4.2.3.	Floculación	70
4.2.4.	Sedimentación	71
4.2.5.	Resultados de la primera prueba de jarras	72
4.2.6.	Análisis estadístico de la primera prueba de jarras	73
4.2.7.	Análisis y modelamiento de la data de la primera prueba de jarras	76
	– Modelo descendente simple	77
	– Modelo descendente corregido y mejorado	77
4.2.8.	Efecto de la degradación de la turbidez en el pH	81
4.2.9.	Efecto de la degradación de la turbidez en la conductividad eléctrica	83
4.3.	Segunda prueba de Coagulación/floculación y sedimentación	85
4.3.1	Análisis estadístico de la segunda prueba de jarras	86
4.3.2	Análisis y modelamiento de la data de la segunda prueba de jarras	87
4.3.3	Efecto de la degradación de la turbidez en el pH del agua	90
4.3.4	Efecto de la degradación de la turbidez en la conductividad eléctrica	91
4.4.	Tercera prueba de Coagulación/floculación y sedimentación	92
4.4.1	Resultados de la tercera prueba de jarras	92
4.4.2	Análisis estadístico de la tercera prueba de jarras	94
4.4.3	Análisis y modelamiento de la data de la tercera prueba de jarras	97
4.4.4	Efecto de la degradación de la turbidez en el pH del agua	100

4.4.5	Efecto de la degradación de la turbidez en la conductividad eléctrica	101
4.5.	Cuarta prueba de Coagulación/floculación y sedimentación	101
4.5.1	Resultados de la cuarta prueba de jarras	101
4.5.2	Análisis estadístico de la cuarta prueba de jarras	102
4.5.3	Análisis y modelamiento de la data de la cuarta prueba de jarras	103
4.5.4	Efecto de la degradación de la turbidez en el pH del agua	105
4.5.5	Efecto de la degradación de la turbidez en la conductividad eléctrica	106
4.6.	Quinta prueba de Coagulación/floculación y sedimentación	106
4.6.1	Resultados de la quinta prueba de jarras	107
4.6.2	Análisis estadístico de la quinta prueba de jarras	108
4.6.3	Análisis y modelamiento de la data de la quinta prueba de jarras	109
4.6.4	Efecto de la degradación de la turbidez en el pH del agua	112
4.6.5	Efecto de la degradación de la turbidez en la conductividad eléctrica	113
4.7.	Sexta prueba de Coagulación/floculación y sedimentación	113
4.7.1	Resultados de la sexta prueba de jarras	113
4.7.2	Análisis estadístico de la sexta prueba de jarras	115
4.7.3	Análisis y modelamiento de la data de la sexta prueba de jarras	116
4.7.4	Efecto de la degradación de la turbidez en el pH del agua	118
4.7.5	Efecto de la degradación de la turbidez en la conductividad eléctrica	118
V.	Discusión de resultados	120
VI.	Conclusiones	122
VII.	Recomendaciones	124
VIII.	Referencias	126
IX.	Anexos	135

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Turbiedad del agua	32
Tabla 2. Características del haba (<i>Vicia faba</i> L.) INIA 409	45
Tabla 3. Tipos del haba (<i>Vicia faba</i> L.)	46
Tabla 4. Composición química y valor nutritivo del haba (<i>Vicia faba</i> L.)	48
Tabla 5. Operacionalización de las variables	58
Tabla 6. Instrumentos para la investigación	59
Tabla 7. Insumos para la investigación	60
Tabla 8. Concentración y volumen de la solución coagulante/floculante por jarra	66
Tabla 9. Resultados de la primera prueba de jarras	72
Tabla 10. Degradación de la turbidez	73
Tabla 11. Efecto de la dosis de coagulante en la turbidez	74
Tabla 12. Turbidez final y turbidez final estimada logísticamente	79
Tabla 13. Variación del pH con la degradación de la turbidez del agua	82
Tabla 14. Resultados de la segunda prueba de jarras	85
Tabla 15. Degradación de la turbidez	86
Tabla 16. Efecto de la dosis de coagulante en la degradación de la turbidez	86
Tabla 17. Turbidez final, turbidez final estimada y dosis de coagulante	88
Tabla 18. Efecto de la degradación de la turbidez en el pH del agua	90
Tabla 19. Resultados de la tercera prueba de jarras	93
Tabla 20. Degradación de la turbidez	94
Tabla 21. Dosis optima del coagulante para la máxima degradación de la turbidez	95
Tabla 22. Turbidez final medido, turbidez final estimada y dosis de coagulante.	99
Tabla 23. Efecto de la degradación de la turbidez en el pH	100
Tabla 24. Resultados de la cuarta prueba de jarras	101

Tabla 25. Degradación de la turbidez y dosis del coagulante	102
Tabla 26. Turbidez final, turbidez estimada y dosis de coagulante	104
Tabla 27. Efecto de la degradación de la turbidez en el pH del agua	105
Tabla 28. Resultados de la quinta prueba de jarras	107
Tabla 29. Degradación de la turbidez y dosis optima del coagulante	108
Tabla 30. Dosis de coagulante, turbidez final y turbidez final estimada	110
Tabla 31. Efecto de la degradación de la turbidez en el pH del agua	112
Tabla 32. Resultados de la sexta prueba de jarras	114
Tabla 33. Dosis optima de coagulante e inflexión en la degradación de la turbidez	115
Tabla 34. Degradación de la turbidez y dosis óptima del coagulante	115
Tabla 35. Turbidez final, turbidez final estimada y dosis del coagulante	117
Tabla 36. Efecto de la degradación de la turbidez en el pH del agua	118

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vista interna de la Planta de tratamiento de agua Santa Ana-Cusco	11
Figura 2. Agua turbia y sus impurezas	31
Figura 3. Fuerzas de repulsión y atracción de partículas cargadas	35
Figura 4. Diagrama del Proceso de coagulación/floculación	39
Figura 5. Coagulación, floculación y sedimentación	41
Figura 6. Coagulación/floculación	43
Figura 7. Haba INIA 409 Munay Angelica	47
Figura 8. Preparación de la harina de haba	47
Figura 9. Pruebas rápidas de coagulación	65
Figura 10. Muestreo del agua turbia del rio Tenerías	68
Figura 11. Jarras con agua turbia (agua cruda)	69
Figura 12. Mezcla rápida (coagulación)	70
Figura 13. Mezcla lenta (floculación)	71
Figura 14. Jarras después de treinta minutos de sedimentación	72
Figura 15. Efecto de la dosis de coagulante en la turbidez del agua	75
Figura 16. Turbidez final, turbidez final estimada y dosis de coagulante	80
Figura 17. Efecto de la degradación de la turbidez en el pH	83
Figura 18. <i>Efecto de la degradación de la turbiedad en la conductividad eléctrica</i>	83
Figura 19. Efecto de la dosis de coagulante en la turbiedad del agua	87
Figura 20. Turbiedad final, turbiedad final estimada y dosis de coagulante	89
Figura 21. Efecto de la degradación de la turbiedad en el pH del agua	91
Figura 22. Degradación de la turbiedad y dosis óptima del coagulante	96
Figura 23. Turbiedad final medida y turbiedad final estimada	99
Figura 24. Degradación de la turbiedad, dosis óptima coagulante y coagulación inversa	102

Figura 25. Turbiedad final y Turbiedad final estimada en función de la Dosis coagulante.	104
Figura 26. Degradación de la turbiedad y dosis optima del coagulante	109
Figura 27. Dosis de coagulante, turbiedad final y turbiedad final estimada.	111
Fig. Nro. 28. Degradación de la turbiedad y dosis óptima del coagulante	116
Figura 29. Turbiedad final medida y turbiedad final estimada	117

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Cartilla informativa del haba INIA 409 Munay Angelica	135
Anexo 2 Método de Nefelometría (medición de la turbiedad del agua)	136
Anexo 3 Método del potenciómetro o medidor del potencial de hidrogeno (pH)	137
Anexo 4 Método de medición de la conductividad eléctrica del agua	138
Anexo 5 Tabla de data: Condiciones fisicoquímicas iniciales y finales del agua del río Tenerías-San Sebastián-Cusco	139

Resumen

Objetivo: El agua, recurso esencial para la vida, requiere tratamientos adecuados para eliminar partículas suspendidas, microorganismos patógenos y metales pesados, que afectan la salud humana y la calidad del agua. La turbiedad, indicador de partículas suspendidas presentes en el agua, demanda procesos de remoción. Este estudio, evaluó la eficacia de la harina de haba cruda (*Vicia faba* L.) como coagulante natural en la reducción de turbiedad del agua. **Metodología:** La investigación es experimental, explicativa, cuantitativa y transversal, en el que se manipulan variables independientes como la dosis del coagulante, velocidad de mezcla rápida (coagulación) y mezcla lenta (floculación), midiendo su impacto en la variable dependiente, la turbidez del agua. **Resultados:** Se llevaron a cabo seis pruebas de jarras con agua del río Tenerías de Cusco. Las muestras de agua presentaron diferentes turbiedades. Los resultados, indican que una solución de harina de haba al 1% p, logra reducir más del 98% de la turbidez en agua entre 281 y 455 NTU, y más del 92% en agua con 88,2 a 114 NTU, evidenciando su alta efectividad. El impacto en el pH y la conductividad eléctrica se califica como insignificante. A la data producida, se aplicó modelamientos matemáticos, resultando el modelo cuadrático como el más adecuado para determinar la dosis óptima del coagulante y el inicio de la coagulación inversa, mostrando que la relación entre la dosis de coagulante y la reducción de turbidez es significativa, con coeficientes de correlación superiores a 0,90 y coeficientes de determinación superior al 90% y un valor de p menor a 0.05. **Conclusión:** La harina de haba cruda, representa una alternativa renovable, biodegradable y eficaz frente al sulfato de aluminio en procesos de potabilización, promoviendo la sostenibilidad y seguridad del recurso hídrico.

Palabras claves: solución de harina de haba cruda¹, agua turbia¹, coagulación/floculación³, coagulación inversa⁴, dosis óptima de coagulante⁵

Abstract

Objective: Water, an essential resource for life, requires appropriate treatment to remove suspended particles, pathogenic microorganisms, and heavy metals that compromise human health and water quality. Turbidity, an indicator of suspended solids in water, necessitates removal processes. This study evaluated the effectiveness of raw faba bean flour (*Vicia faba* L.) as a natural coagulant in reducing water turbidity. **Methodology:** This is an experimental, explanatory, quantitative, and cross-sectional study. Independent variables such as coagulant dosage, rapid mixing speed (coagulation), and slow mixing speed (flocculation) were manipulated to assess their impact on the dependent variable—water turbidity. Results: Six jar tests were conducted using water from the Tenerías River in Cusco. The water samples exhibited varying levels of turbidity. The results show that a 1% w/v raw faba bean flour solution was able to reduce turbidity by more than 98% in water with initial turbidity levels between 281 and 455 NTU, and by more than 92% in water with turbidity ranging from 88.2 to 114 NTU, demonstrating high effectiveness. The impact on pH and electrical conductivity was deemed negligible. Mathematical modeling was applied to the data, with the quadratic model proving most suitable for determining the optimal coagulant dosage and identifying the onset of overdosing (inverse coagulation). The relationship between coagulant dosage and turbidity reduction was statistically significant, with correlation coefficients above 0.90, determination coefficients over 90%, and a p-value less than 0.05. **Conclusion:** Raw faba bean flour represents a renewable, biodegradable, and effective alternative to aluminum sulfate in drinking water treatment processes, promoting the sustainability and safety of water resources.

Keywords: Raw faba bean flour solution¹, Turbid water², Coagulation/flocculation³, Inverse coagulation⁴, Optimal coagulant dosage⁵

I. Introducción

A nivel mundial, el acceso a agua potable se ha convertido en un desafío creciente, debido al aumento de la población, la contaminación de fuentes hídricas y la alta demanda del recurso. Para garantizar la calidad del agua, se utilizan coagulantes químicos como el Sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$), Cloruro de aluminio (AlCl_3), Policloruro de aluminio (PAC), Sulfato ferroso ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), Sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) y Cloruro férrico (FeCl_3), siendo el sulfato de aluminio el más utilizado y reconocido por su eficacia en la remoción de turbiedad y color. No obstante, su uso prolongado ha generado preocupación por sus efectos adversos sobre la salud humana -debido a la presencia de trazas de aluminio en el agua tratada - y sobre el medio ambiente, por la generación de lodos tóxicos y no biodegradables. Esto ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles, como los coagulantes naturales de origen vegetal o biopolímeros, que presentan menor toxicidad y son ambientalmente más seguros.

En América Latina y, particularmente, en contextos locales donde los recursos técnicos y económicos son limitados, se ha incrementado el interés por el uso de coagulantes naturales como la Moringa oleífera, el quitosano y otros extractos vegetales. En este marco, la presente investigación, propone evaluar la eficacia de la harina de haba cruda (*Vicia faba* L.) como coagulante y floculante natural para el tratamiento de agua, analizando su capacidad para reducir la turbiedad y su impacto en parámetros como el pH y la conductividad eléctrica. Se busca así contribuir al desarrollo de tecnologías más sostenibles y accesibles que fortalezcan la salud pública y la protección del medio ambiente a nivel local.

1.1 Planteamiento del problema

El crecimiento acelerado de la población mundial, ha generado un aumento significativo en la demanda de agua potable, lo que ha intensificado el uso de productos químicos para su tratamiento. Uno de los compuestos más utilizados en los procesos de coagulación y floculación es el sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$), cuya aplicación, aunque eficaz en la remoción de

la turbiedad y color, conlleva efectos adversos sobre la salud humana y el medio ambiente. Entre estos impactos destacan la formación de lodos no biodegradables con alto contenido de metales, el incremento de la conductividad eléctrica, la alteración del pH y la incorporación de trazas de aluminio en el agua tratada, lo que ha suscitado preocupación en la comunidad científica y sanitaria. La situación descrita, requiere ser revertido, mediante el uso de coagulantes amigables con la salud y el medio ambiente, como los coagulantes naturales. En esa perspectiva, es necesario identificar e implementar diversas metodologías y procesos bioquímicos para la producción de agua potable, asegurando así, la calidad, la salud pública y la sostenibilidad ambiental.

La producción de agua potable comienza con la captación del agua cruda y continúa a través de una serie de procesos que incluyen coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. En consecuencia, la potabilización del agua es un procedimiento esencial para garantizar el acceso a agua de calidad para las comunidades humanas (Chulluncuy, 2011).

Ante el incremento del uso del sulfato de aluminio, con los efectos secundarios descritos, se explora el uso de polímeros naturales, para optimizar el tratamiento y minimizar los riesgos para la salud y el medio ambiente, puesto que la alúmina incorpora iones de aluminio al cuerpo del agua tratada y produce lodos tóxicos. En el sur de Brasil, se llevaron a cabo pruebas en una planta de tratamiento de agua cruda, utilizando dos polímeros naturales a base de taninos, en comparación con el sulfato de aluminio. Se utilizó la técnica de la prueba de jarras, aplicando una dosis de 15 mg/L de polímero natural, logrando reducciones de hasta el 90% en la turbiedad inicial y del 86% en el color del agua. Además, se verificó que no hubo incrementos en la alcalinidad, el pH, la conductividad eléctrica ni el contenido de materia orgánica. Al comparar estos resultados, con los obtenidos utilizando sulfato de aluminio, se concluyó que era viable sustituir este coagulante metálico por polímeros naturales a base de

taninos, manteniendo la eficacia del tratamiento y contribuyendo a la protección del medio ambiente y la salud pública (Oliveira et al., 2021).

La coagulación y floculación constituyen etapas fundamentales en la clarificación del agua; sin embargo, su eficacia depende en gran medida de la dosificación adecuada del coagulante, la cual, tradicionalmente, se determina mediante ensayos de prueba de jarras. Esta metodología presenta limitaciones, como la incapacidad de adaptarse en tiempo real a los cambios en los parámetros fisicoquímicos del agua y la necesidad de operar dentro de un punto óptimo específico. En el presente estudio, se determinó la dosificación óptima de sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) a través de un modelo de Red Neuronal Artificial (RNA), el cual permite ajustar la dosis del coagulante en función de las variaciones en la turbiedad. Esta estrategia garantiza una coagulación eficiente, evita sobredosificaciones o deficiencias en el tratamiento y reduce la dependencia de pruebas constantes, lo que a su vez disminuye pérdidas económicas asociadas al uso inadecuado del coagulante. La aplicación del modelo demostró una remoción de turbiedad superior al 93 % en la mayoría de los casos, evidenciando que el uso de RNA constituye una herramienta eficaz para optimizar la dosificación y promover procesos de tratamiento más eficientes y sostenibles. No obstante, es relevante considerar que el empleo de sulfato de aluminio puede generar efectos adversos sobre la salud humana y el medio ambiente (Barajas y León, 2015).

El uso de coagulantes naturales en el tratamiento de agua para su potabilización, bajo un enfoque ambiental y eco-toxicológico, permitió comparar su eficacia frente a coagulantes sintéticos, en particular el sulfato de aluminio. Los resultados demostraron que los coagulantes naturales pueden ser igual de efectivos que sus equivalentes sintéticos, con la ventaja adicional de reducir el impacto negativo en los ecosistemas acuáticos. En consecuencia, los coagulantes y floculantes naturales se posicionan como una alternativa sostenible, con mínimos efectos

secundarios, para la producción de agua potable, promoviendo la salud ambiental y asegurando la calidad del recurso hídrico destinado al consumo humano (Bouaidi et al., 2022)

En laboratorio, se desarrolló un estudio sobre los procesos de coagulación y floculación aplicados a aguas residuales provenientes de una empresa textil, con el objetivo de evaluar la eficacia del sulfato de aluminio en la reducción de sólidos suspendidos y otros contaminantes presentes. Para ello, se empleó la prueba de jarras como metodología, evidenciando que la coagulación y floculación son procesos consolidados que permiten aglomerar micropartículas dispersas en flóculos de mayor tamaño, los cuales pueden ser eliminados posteriormente por sedimentación o filtración. Se constató que la optimización de las condiciones operativas, puede maximizar la eficiencia del tratamiento. En síntesis, los hallazgos obtenidos constituyen un aporte valioso para el tratamiento de aguas residuales en la industria textil y pueden ser aplicados para fomentar prácticas más sostenibles desde el punto de vista ambiental (Cabrera et al., 2020).

Se llevó a cabo una comparación entre dos coagulantes utilizados para la clarificación del agua, la *Moringa oleífera*, un producto natural reconocido por sus propiedades coagulantes, y el sulfato de aluminio, un coagulante sintético de uso tradicional, mediante la técnica de la prueba de jarras. El objetivo de estas pruebas fue evaluar la eficacia de ambos coagulantes bajo diversas condiciones. Los resultados indicaron que la *Moringa oleífera* podría ser una alternativa viable y sostenible al sulfato de aluminio, ofreciendo beneficios tanto ambientales como económicos. Además, se discutieron las implicaciones de estos hallazgos para el tratamiento de aguas en comunidades con recursos limitados. En conclusión, la *Moringa oleífera* se presenta como una opción natural para el tratamiento de aguas turbias, lo que podría fomentar prácticas más sostenibles en la gestión del agua (Ferreira et al., 2018).

Al abordar la relevancia de la coagulación y floculación en la clarificación del agua, se utiliza el test de jarras para ilustrar el primer proceso fisicoquímico involucrado. Este proceso

consiste en la adición de sustancias químicas, cuya finalidad es aglutinar las partículas en suspensión, formando flóculos y agrupamientos más grandes que facilitan su precipitación mediante la acción de la gravedad. En el presente estudio, se emplean diferentes coagulantes, como el sulfato de aluminio, y se analizan diversos factores que pueden influir en la eficiencia de estos procesos, tales como el pH y la temperatura. Finalmente, se resalta que la coagulación y floculación son fundamentales para la producción de agua potable de calidad, lo que contribuye a la salud pública y a la protección del medio ambiente (Bratby, 2016).

Utilizando la prueba de jarras, se compararon diferentes coagulantes en el tratamiento de agua, incluyendo el sulfato de aluminio, un producto convencional, y coagulantes naturales como alternativas sostenibles. Se evaluó la eficacia de estos coagulantes en la eliminación de impurezas y turbiedad del agua, así como sus impactos en el medio ambiente y la salud pública. Además, se analizaron los costos y la disponibilidad de estos coagulantes, sugiriendo que las alternativas sostenibles pueden resultar viables en determinadas condiciones. En conclusión, se hace un llamado a realizar una evaluación más exhaustiva de los coagulantes alternativos, promoviendo así prácticas de tratamiento de agua más sostenibles y eficientes (Talib y Musawi, 2021).

Las técnicas tradicionales de coagulación y floculación del agua emplean productos químicos sintéticos para reducir la turbiedad, el color, la alcalinidad y la presencia de microorganismos, logrando altos niveles de eficiencia. Sin embargo, estos métodos conllevan efectos secundarios que representan riesgos tanto para la salud humana como para el medio ambiente, ya que alteran el pH, introducen trazas de aluminio en el agua y generan lodos metálicos tóxicos que no son biodegradables. La disposición final de estos lodos resulta complicada y costosa, además de ser perjudicial para el entorno. Ante esta problemática, se están investigando diversas fuentes de productos naturales, como extractos de plantas y biopolímeros, para evaluar su efectividad en la eliminación de contaminantes del agua.

Asimismo, se estudió el impacto eco toxicológico de estos coagulantes en sistemas acuáticos, subrayando la necesidad de seleccionar alternativas sostenibles que reduzcan la toxicidad y favorezcan la salud del medio ambiente. En consecuencia, los coagulantes naturales emergen como una opción prometedora para la producción de agua potable, con un enfoque en la sostenibilidad y la mitigación de riesgos eco toxicológicos (Bouaidi et al., 2022).

Al evaluar la eficacia de la proteína extraída de las semillas de *Moringa oleífera* en el tratamiento del agua del embalse de Opa, en Ile-Ife, Nigeria, y utilizando el test de jarras, se confirmaron las propiedades coagulantes de esta planta, consolidándose como una alternativa sostenible y económica para el tratamiento de aguas. Las pruebas realizadas para medir el efecto de estas proteínas en la turbiedad y calidad del agua demostraron su efectividad en la reducción de la turbiedad, lo que sugiere que puede ser una solución viable para mejorar la calidad del agua en la región. Además, se compararon las ventajas de utilizar este recurso local y natural frente a los coagulantes químicos, que pueden tener efectos adversos en el medio ambiente. El resultado práctico, fue una reducción de hasta un 58,18 % de la turbiedad inicial del agua, con la turbiedad remanente dentro de los parámetros de aceptabilidad establecidos en el país, lo que se consideró un resultado satisfactorio. También se observó que este producto natural posee propiedades bio coagulantes y que genera lodos biodegradables. En conclusión, el marango (*Moringa oleífera*) se presenta como una opción prometedora para el tratamiento de agua, contribuyendo a la sostenibilidad y a la salud pública en comunidades donde el acceso a agua limpia representa un desafío (Taiwo et al., 2020).

Al utilizar el extracto de *Moringa Oleífera*, como coagulante natural para eliminar la turbiedad de los efluentes industriales, en una planta de producción de néctar de maracuyá, se evidenció que poseía notables propiedades coagulantes. Esto la posiciona como una alternativa sostenible frente a los métodos químicos tradicionales, además de ser una propuesta eficaz para mejorar la calidad del agua en procesos industriales. Mediante la prueba de jarras, se logró una

remoción de turbiedad que osciló entre el 92.25% y el 94.16% de la turbiedad inicial del agua residual, utilizando una dosificación de la solución coagulante de Moringa oleífera de entre 290 y 400 mg/L, para turbiedades iniciales de 335 y 500 NTU. El estudio también reveló, que el uso de coagulantes y floculantes químicos sintéticos está generalizado, siendo el sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$) el más común. Sin embargo, su uso masivo y prolongado ha generado problemas de salud y ambientales, lo que impulsa la búsqueda de alternativas naturales que presenten menos riesgos. Es fundamental reafirmar algunos conceptos científicos, como que la coagulación es un proceso fisicoquímico que neutraliza las cargas eléctricas de los coloides mediante la adición de sustancias con cargas opuestas, lo que facilita su agrupación y la formación de flóculos que, por efecto de la gravedad, sedimentan. Los coagulantes, pueden ser naturales o sintéticos; los sintéticos incluyen polímeros solubles en agua, como la acrilamida y el ácido acrílico, mientras que los inorgánicos, son compuestos químicos basados en sales metálicas ampliamente utilizadas en el tratamiento de aguas superficiales y residuales por su rendimiento y efectividad. Por otro lado, los coagulantes naturales, principalmente de origen vegetal, están siendo objeto de estudio en diversas partes del mundo, demostrando una notable eficacia en la remoción de turbiedad y color. Además, se discuten las ventajas ambientales y económicas de utilizar un recurso natural como la Moringa oleífera, que es accesible y ofrece múltiples beneficios. En conclusión, el uso del extracto de moringa como solución ecológica para el tratamiento de efluentes industriales es viable y contribuye a fomentar prácticas más sostenibles en la industria alimentaria (Álvarez, 2019).

Se llevó a cabo un estudio sobre el uso del extracto de semilla de Moringa Oleífera, como coagulante natural en el tratamiento de aguas superficiales. Este extracto, rico en proteínas con la capacidad de aglutinar partículas y contaminantes, fue evaluado mediante la prueba de jarras en laboratorio. Los resultados mostraron una reducción significativa de la turbiedad, con niveles que oscilaban entre 5, 10 y hasta 60 NTU, así como una disminución de

contaminantes como *Microcystis aeruginosa*. Esto posiciona a la *Moringa Oleífera* como una alternativa sostenible y ecológica a los coagulantes químicos tradicionales, como el sulfato de aluminio. Además, se discutieron otros beneficios de la *Moringa oleífera*, incluyendo su disponibilidad y bajo costo en comparación con otros métodos de tratamiento de agua. En conclusión, se determinó que las proteínas de la *Moringa oleífera* son altamente eficaces como coagulantes para la reducción de la turbiedad y la eliminación de cianobacterias, especialmente en el tratamiento de aguas superficiales con altos niveles de turbiedad (Camacho et al., 2017).

El uso de quitosano, un biopolímero natural derivado de la quitina, en pruebas de jarras ha demostrado su capacidad para optimizar la eficacia de los filtros cerámicos, comúnmente utilizados para purificar agua en áreas rurales y en desarrollo. Los resultados evidenciaron que el quitosano no solo reduce la turbidez del agua, sino que también mejora significativamente la eliminación de microorganismos patógenos. Este biopolímero actúa como un agente coagulante eficaz, facilitando la degradación de la turbidez y la eliminación de microorganismos durante el proceso de filtración cerámica. El estudio confirmó que la coagulación es el proceso más relevante para remover partículas coloidales, microorganismos y otras sustancias responsables del color, turbiedad, mal olor y sabor desagradable del agua. En conclusión, la combinación de quitosano y filtración cerámica representa una estrategia efectiva y sostenible para mejorar la calidad del agua potable, lo que podría tener un impacto positivo en la salud pública. Este enfoque se perfila como una solución prometedora para el tratamiento de agua en contextos donde el acceso a agua limpia es un desafío (Abebe et al., 2016).

Se investigó el potencial de los coagulantes naturales de origen vegetal como alternativas sostenibles para la clarificación del agua, analizando diversas fuentes vegetales, como las semillas de *Moringa oleífera*, el quitosano y otros extractos. Se destacaron sus propiedades coagulantes y su eficacia en la eliminación de turbiedad y contaminantes del agua. En las plantas de tratamiento convencionales, se identificaron varios inconvenientes, siendo

uno de los más significativos la remoción y disposición final segura de los lodos generados en los decantadores, los cuales, debido a su contenido de metales (trazas de aluminio), representan un riesgo para el medio ambiente y la salud. Se subrayaron las ventajas de utilizar coagulantes naturales en comparación con los químicos tradicionales, que pueden tener efectos adversos sobre el entorno y la salud humana. Los coagulantes vegetales son, en general, más seguros, biodegradables y accesibles, lo que los convierte en una opción atractiva para el tratamiento de agua, especialmente en comunidades rurales y en desarrollo. En conclusión, la utilización de coagulantes naturales puede contribuir a prácticas de tratamiento de agua más sostenibles y ecológicas, promoviendo la salud pública y la conservación del medio ambiente. Sin embargo, es necesario realizar más investigaciones para optimizar su uso y evaluar su efectividad en diferentes contextos (Choy et al., 2014).

El objetivo de la presente investigación es analizar de manera exhaustiva la actividad de la harina de haba cruda (*Vicia faba* L.) como un coagulante y floculante natural en la reducción de la turbiedad del agua. En primer lugar, se busca evaluar la eficacia de este producto en la remoción significativa de la turbiedad del agua, un indicador crítico de la calidad del agua. Además, se llevará a cabo un estudio detallado sobre el proceso de preparación de la solución coagulante y floculante, lo que incluye la identificación de las condiciones óptimas para su obtención, así como la estandarización de los métodos de aplicación.

Asimismo, se investigará el efecto que esta solución tiene sobre parámetros importantes como el potencial de hidrógeno (pH) y la conductividad eléctrica del agua, ya que estos factores son fundamentales para comprender el comportamiento del agua tratada y su idoneidad para diversos usos.

Por último, se determinará la dosificación óptima de la harina de haba cruda para asegurar una coagulación y floculación efectivas, proporcionando así una alternativa sostenible y accesible para el tratamiento de aguas. Los resultados de esta investigación contribuirán al

conocimiento científico sobre el uso de coagulantes naturales, particularmente de la harina de haba seca y cruda, con implicaciones significativas para el desarrollo de tecnologías de tratamiento de agua más ecológicas y económicas.

1.2 Descripción del problema.

El acceso al agua potable, constituye un derecho humano esencial, reconocido por la Asamblea General de las Naciones Unidas mediante Resolución A/RES/64/292, adoptada el 28 de julio de 2010. Esta resolución declara que: *"El derecho al agua potable y el saneamiento es un derecho humano esencial para el pleno disfrute de la vida y de todos los derechos humanos"*. Esta resolución, establece la obligación de los Estados miembros a garantizar, sin discriminación, el acceso universal al agua limpia y a servicios de saneamiento adecuados, bajo principios de equidad, sostenibilidad y responsabilidad estatal. Este acuerdo, representa un paso significativo hacia la mejora de la calidad de vida de millones de personas a nivel global.

En el ámbito nacional, el Perú ratifica este compromiso a través del Decreto Supremo N.º 031-2010-SA, que reconoce el acceso al agua segura como un derecho humano fundamental. La norma, establece estándares de calidad física, química, microbiológica y radiológica del agua para consumo humano, así como disposiciones sobre monitoreo, control, sanciones y educación sanitaria. Estos marcos normativos constituyen herramientas clave para proteger la salud pública y promover una gestión integral del recurso hídrico. Este reglamento es fundamental para garantizar que el agua que consumen los peruanos sea segura y de calidad, contribuyendo a la salud pública y al bienestar general.

Sin embargo, a pesar del avance normativo, persisten importantes brechas en la cobertura y calidad del servicio, especialmente en zonas rurales. Según los Censos Nacionales 2017, de los 8,438 centros poblados identificados en el departamento de Cusco, apenas 1,255 cuentan con acceso a un sistema de agua potable. Esta realidad fue confirmada por el diagnóstico nacional sobre el abastecimiento de agua y saneamiento rural (DATASS, 2024), el

cual señala que el 55.99% de dichos centros poblados carecen de sistemas adecuados de abastecimiento de agua.

En muchos de estos casos, el suministro se realiza mediante sistemas precarios de almacenamiento y entubado, que dependen de procesos de desinfección con cloro. No obstante, en ausencia de Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP), estos tratamientos resultan insuficientes frente a la presencia de sólidos solubles e insolubles, así como a parámetros inadecuados de color, olor, sabor y pH, especialmente durante la temporada de lluvias. Esta situación compromete la calidad del agua consumida, incrementando los riesgos sanitarios para las poblaciones rurales y vulnerables.

Por tanto, se evidencia una contradicción entre los principios reconocidos en las normas internacionales y nacionales, y la realidad que enfrentan miles de personas en el ámbito rural cusqueño. Esta problemática requiere una evaluación técnica rigurosa que permita identificar las causas estructurales de esta brecha y proponer soluciones sostenibles y culturalmente adecuadas.

Figura 1

Vista interna de la Planta de Tratamiento de Agua Santa Ana- Cusco.



*Nota: Reproducida de la Memoria Anual de SEDA CUSCO (2023).
<https://www.sedacusco.com/transparencia/memoria/2023.pdf>*

La figura 1, muestra el interior de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) mejor implementada, que atiende aproximadamente al 40% de la población de la ciudad de Cusco.

La potabilización del agua es un proceso crucial para garantizar la seguridad sanitaria de las poblaciones, especialmente en contextos rurales donde la infraestructura de tratamiento suele ser limitada. Entre los insumos convencionales empleados, el sulfato de aluminio es uno de los coagulantes más utilizados para remover turbiedad en el agua. No obstante, diversos estudios advierten que su uso puede generar efectos colaterales no deseados, tales como:

- La generación de lodos con características tóxicas que requieren una disposición adecuada y generalmente costosa (Kyncl et al., 2012)
- Alteraciones del pH del agua (acidificación), que puede comprometer su potabilidad (Yang et al., 2010)
- La incorporación de trazas de aluminio, que, en dosis acumulativas, representan un potencial riesgo para la salud humana. (Hürtgen et al., 2018)

Frente a este escenario, surge la necesidad de identificar alternativas más sostenibles y seguras. La presente investigación, se propone evaluar el uso de harina de haba (*Vicia faba* L.) como un coagulante y floculante natural en procesos de potabilización, con el objetivo de reducir significativamente los niveles de turbiedad del agua sin comprometer su calidad fisicoquímica ni generar residuos peligrosos. El estudio abordará los siguientes aspectos técnicos:

- Preparación de la solución coagulante/floculante a partir de harina de haba (*Vicia faba* L.), determinando su composición y estabilidad.
- Evaluación del efecto de dicha solución sobre la turbiedad, mediante ensayos controlados en laboratorio.

- Determinación de la dosis óptima de la solución coagulante, para la reducción significativa de la turbiedad y su influencia sobre parámetros como el potencial de hidrógeno (pH) y la conductividad eléctrica del agua tratada.

Para la investigación, se utilizó como materia prima, haba de la variedad local INIA 409-Cusco “Munay Angélica”, seleccionada por su disponibilidad y valor económico en la región, atendiendo, además, a la recomendación de INIA-Cusco (MIDAGRI).

Esta propuesta busca generar evidencia científica sobre la viabilidad de sustituir coagulantes químicos sintéticos por alternativas de origen vegetal, lo que contribuiría a la implementación de soluciones más resilientes, accesibles y respetuosas del ambiente.

1.3 Formulación del problema

1.3.1 Problema general

¿En qué medida, la harina de haba (*Vicia faba* L.) como coagulante y floculante natural, permite la degradación significativa del nivel de turbidez del agua en Cusco - Perú, 2024?

1.3.2 Problemas específicos

- ¿De qué manera se preparará la solución coagulante y floculante natural, con harina de haba (*Vicia faba* L.), para degradar significativamente la turbidez del agua en Cusco-Perú, 2024?
- ¿En qué medida, el efecto de la solución coagulante y floculante natural, preparada con harina de haba (*Vicia faba* L.), permite la degradación de la turbidez del agua en Cusco-Perú, 2024?
- ¿Cuál es la dosis adecuada, para determinar la eficiencia de la solución natural de la harina de haba (*Vicia faba* L.) en la coagulación y floculación, que permita degradar significativamente la turbidez del agua en Cusco-Perú, 2024?

1.4 Antecedentes

1.4.1 Antecedentes internacionales

Bouaidi et al. (2022) en el estudio “Coagulantes de origen natural para el tratamiento de agua potable: una visión eco toxicológica. Investigación sobre el medio ambiente acuático”, abordan el tema del uso de coagulantes de origen natural en el tratamiento de aguas, orientado a su impacto eco toxicológica en el medio ambiente acuático, con cuya finalidad, utilizan diversas fuentes naturales de coagulantes, analizando los extractos de plantas y otros materiales orgánicos, para comparar su eficacia y seguridad con los de los coagulantes químicos tradicionales, caracterizados por precipitar lodos tóxicos, modificar el pH y la conductividad eléctrica del agua. El estudio destaca las ventajas medioambientales de los coagulantes naturales, entre ellas la biodegradabilidad de los lodos producidos y su menor toxicidad. En base a estudios previos, se opta por la necesidad de evaluaciones eco toxicológicas de los coagulantes naturales, para garantizar la eficacia del tratamiento como la seguridad para el ecosistema. En conclusión, el estudio sugiere que los coagulantes naturales, son una alternativa viable y menos perjudicial que los coagulantes químicos, no obstante, se requieren más investigaciones que permitan establecer protocolos de uso para minimizar los riesgos ecológicos.

Taiwo et al. (2020) en el estudio titulado “Eficacia de una proteína coagulante natural de semillas de Moringa oleífera (Lam) en el tratamiento del agua del embalse de Opa, Ile-Ife, Nigeria”, evaluaron el potencial coagulante de una proteína extraída de las semillas de Moringa oleífera para el tratamiento del agua del embalse de Opa, ubicado en Ile-Ife, Nigeria. Para ello, emplearon la técnica de prueba de jarras con el fin de medir la eficiencia del coagulante natural en la reducción de la turbiedad. Los resultados indicaron una disminución de hasta un 58,18 % en la turbiedad inicial del agua, logrando niveles que se encuentran dentro de los parámetros de calidad establecidos a nivel nacional, lo cual fue considerado satisfactorio. Además, los

investigadores destacaron que el coagulante natural posee propiedades biocoagulantes, y que los lodos generados durante el proceso de tratamiento son biodegradables, lo que representa una ventaja ambiental significativa frente a los coagulantes químicos convencionales. En conclusión, el estudio sugiere que la proteína de *Moringa oleífera* no solo es eficaz para reducir la turbiedad y mejorar la calidad del agua, sino que también constituye una alternativa viable, económica y ambientalmente sostenible para el tratamiento del agua. Finalmente, los autores subrayan la importancia de fomentar el uso de recursos naturales en los procesos de purificación, promoviendo prácticas de gestión hídrica más responsables y sostenibles

Taron et al. (2017) en la “Evaluación de la *Cassia fistula* como coagulante natural en el tratamiento primario de aguas residuales”, se propusieron el uso de un coagulante natural, para la clarificación de aguas residuales. Evaluaron la semilla de la *Cassia fistula* como coagulante primario y alternativo, para el tratamiento de aguas residuales. La metodología utilizada, fue la prueba de jarras. Los resultados alcanzados fueron los siguientes: para una dosificación de 160 mg/L de coagulante, el valor mínimo de la turbiedad fue de 30.25 Unidades Nefelométricas de Turbiedad (NTU) y para el color 84 Unidades Platino-Cobalto (UPC). Se estableció además que el Potencial de Hidrógeno (pH) no fue afectado, pero si la alcalinidad total y dureza del agua. Estos rangos de parámetros fisicoquímicos del agua tratada se encontraban en los límites permitidos para aguas residuales, no requiriendo mayor tratamiento.

Feria et al. (2014) en la investigación “Eficiencia de la semilla de la *Moringa oleífera* como coagulante natural para la remoción de la turbidez del río Sinú”, se abocaron a estudiar la eficiencia de la semilla de *Moringa Oleífera* para remover la turbiedad del agua de una fuente superficial (río). De inicio, cuestionaron que, para remover la turbiedad del agua, estaban utilizando como coagulante productos químicos sintéticos y costosos. Ante este hecho, se propusieron utilizar un coagulante natural y abundante como la semilla de la *Moringa oleífera*, una alternativa sostenible, económica y segura para la potabilización del agua.

Evaluaron la eficiencia de la semilla de *Moringa Oleífera* como coagulante y su efecto sobre el pH y la alcalinidad del agua. Utilizaron la prueba de jarras, y el resultado obtenido fue una alta eficiencia de remoción de la turbiedad, mayor al 90% con dosis que van de 4,5 mg/L a 17,5 mg/L de coagulante natural preparado con *Moringa Oleífera*, además, notaron que no se evidenciaba alteraciones significativas en el Potencial de Hidrogeno (pH) y la alcalinidad, concluyendo, que la *Moringa Oleífera* era un coagulante eficaz, seguro y económico.

Torrellas (2013) en su trabajo “*La exposición al aluminio y su relación con el ambiente y la salud*”, la autora, como profesional química, expone en forma amplia y bastante precisa, los efectos del Aluminio sobre el medioambiente y la salud de las personas. Sostiene que el aluminio es un metal muy abundante en la naturaleza y que, en el mundo científico, se conoce su alta toxicidad y por tanto el riesgo que representa para el ambiente y la salud, sin embargo, se sigue manteniendo su biodisponibilidad, supuestamente dentro de parámetros no riesgosos para la salud, sin considerar que la naturaleza es capaz de modificarla, aún más, la acción humana, liberándola e incrementado su incidencia en enfermedades y acumulación peligrosa en el ambiente. Afirma que el aluminio, esta biodisponible en los alimentos, medicamentos, cosméticos y en el agua potable tratada con sulfato de aluminio. Este trabajo, constituye una reflexión importante sobre los diferentes riesgos e impactos del aluminio sobre la salud y el medio ambiente.

Castrillón y Giraldo (2012) en la investigación “Determinación de las dosis óptimas del coagulante sulfato de aluminio granulado tipo B en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de Tratamiento de Villa Santana”, realizaron ensayos de tratabilidad, utilizando diferentes muestras de agua, muestreadas durante un periodo específico. El estudio se centró en la búsqueda de la dosis óptima del sulfato de aluminio granulado tipo B, como coagulante en el proceso de potabilización del agua, en la planta de Tratamiento de Villa Santana. Los autores analizaron el cómo las variaciones en la turbiedad y el color del agua

influyen en la eficacia del coagulante. El estudio se basa en la recolección de muestras de agua en diferentes condiciones de turbiedad y color, y se realizan ensayos de coagulación, mediante la prueba de jarras, para determinar las dosis más efectivas de sulfato de aluminio, para reducir adecuadamente estos parámetros, logrando reducir la turbiedad por encima del 90 % y el color por encima del 90 %, sin mayor afectación al pH. Los resultados obtenidos, evidencian que la relación entre la turbiedad y el color en el agua es fundamental, para establecer las dosis óptimas del coagulante, lo que permite optimizar el proceso de potabilización y garantizar un agua que cumpla con los estándares de calidad. La investigación, concluye en que un entendimiento detallado de la relación entre la turbiedad y color del agua puede llevar a una mejora sustancial en la eficiencia del tratamiento del agua, beneficiando tanto la salud pública como el manejo sostenible de los recursos hídricos.

Solís et al. (2012) en la investigación sobre “*Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales*”, los investigadores, trabajaron con mezclas de coagulantes sintéticos y naturales, empleando con esa finalidad el sulfato de aluminio $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}]$ y el almidón de yuca. Como metodología de trabajo recurrieron a la prueba de jarras. Primero, utilizaron solo el Sulfato de Aluminio, para determinar la dosis óptima de este producto, estableciendo que este era de 30 mg/L, para agua con una turbiedad de hasta 70 NTU, color de 85 Unidades (CU) y pH de 6,8. Sobre este resultado, prepararon mezclas diversas de Sulfato de Aluminio y almidón de yuca, con distintas proporciones de ambos reactivos, realizando las pruebas de jarras para cada caso, obteniendo el mejor resultado para una mezcla de 2 mg/L de almidón de yuca y 28 mg/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, mezcla que redujo hasta el 97.9 % de la turbiedad del agua superficial tratada. Así mismo, concluyeron que el almidón de yuca, es un excelente ayudante para remover el color del agua, además, reduce el costo, el impacto ambiental y los efectos negativos en la salud. Los resultados muestran que algunas de las mezclas probadas tienen un rendimiento prometedor en la clarificación del agua, sugiriendo

que pueden ser una alternativa viable a los coagulantes tradicionales. Además, se discutieron las implicaciones ambientales y económicas de utilizar estos coagulantes alternativos. En conclusión, el estudio destaca la importancia de investigar y desarrollar coagulantes alternativos para mejorar la calidad del agua y propone vías para futuras investigaciones en este campo.

Montoya et al. (2011), “*Efecto del incremento en la turbiedad del agua cruda sobre la eficiencia de procesos convencionales de potabilización*”, los autores, muestran su preocupación sobre el impacto del incremento de la turbiedad en la eficacia de los métodos de tratamiento tradicionales de potabilización del agua. Se emplearon equipos de laboratorio standard para medir la turbiedad y otros parámetros fisicoquímicos del agua, principalmente el equipo de prueba de jarras. Los reactivos utilizados fueron seleccionados, en función de su efectividad en la coagulación y se incluyeron polielectrolitos y sales metálicas. Los resultados indicaron que a medida que aumentaba la turbiedad del agua cruda, la eficiencia de los procesos de potabilización disminuía, observándose que, a altos valores de turbiedad, se requería mayor cantidad de coagulante para alcanzar los estándares de calidad de agua potable. Las pruebas, se realizaron en condiciones controladas, que imitaban un proceso de potabilización real, con variaciones en la turbiedad y otros parámetros del agua. Se utilizaron diferentes niveles de turbiedad, con múltiples réplicas de las pruebas, para garantizar la validez de los resultados obtenidos. Se concluye, que la turbiedad es un factor crítico que afecta la eficacia de los tratamientos convencionales, resultando importante considerar la turbiedad del agua cruda en el diseño y operación de plantas de tratamiento de agua, para asegurar un proceso de potabilización eficiente.

Suay y Ballester (2002) en *Revisión de los estudios sobre exposición al aluminio y enfermedad de Alzheimer*. Realizaron una exhaustiva revisión y análisis de diversos estudios empíricos y epidemiológicos sobre la exposición al aluminio y la enfermedad de Alzheimer (EA). La curiosidad, estuvo enfocada en la acumulación de aluminio en el tejido cerebral de

pacientes con EA, así como las posibles vías de exposición, como pueden ser alimentos, medicamentos y entornos laborales. El análisis se centró en la discusión de la naturaleza del aluminio y su biodisponibilidad, su toxicidad y mecanismos potenciales de acción que podrían contribuir a la neurodegeneración. A pesar de la diversidad de hallazgos, los autores concluyen que, aunque algunos estudios sugieren una relación entre la exposición al aluminio y el desarrollo de EA, los resultados no son concluyentes. La evidencia actual, no permite establecer definitivamente que el aluminio sea el factor causal de la enfermedad de Alzheimer, siendo necesario más investigaciones que permitan aclarar esta posible relación.

1.4.1 Antecedentes nacionales

Aldana (2012) en *Uso del extracto de la semilla de moringa oleífera como coagulante natural primario y ayudante de coagulación en el tratamiento de agua para consumo humano*, el trabajo, se enfoca en el uso del extracto de la semilla de Moringa oleífera, como un coagulante natural en el tratamiento de aguas del río Rímac (Lima) para consumo humano. Se estudia la eficacia de este extracto en comparación con coagulantes químicos convencionales, como el sulfato de aluminio, evaluando su rendimiento en la reducción de la turbiedad y contaminantes del agua. El estudio, describe el proceso de obtención del extracto de las semillas de moringa, así como su aplicación en diversas condiciones experimentales. Utilizando la prueba de jarras, se analizó la dosis óptima del extracto necesario para lograr una coagulación eficiente, comparando los resultados con los obtenidos al utilizar el sulfato de aluminio. Los resultados indican que el extracto de moringa reduce eficazmente la turbidez, adicionalmente presenta beneficios como su biodegradabilidad y su menor toxicidad. También, se llegó a discutir las ventajas económicas y la sostenibilidad de utilizar un coagulante natural, especialmente en comunidades con recursos limitados. Se concluye, que el extracto de semilla de Moringa oleífera es una alternativa viable y ecológica para el tratamiento de agua, aportando a la búsqueda de soluciones sostenibles en la potabilización del agua.

Álvarez (2019) en su estudio titulado *Extracto de moringa (Moringa oleífera) para la remoción de turbidez de efluentes de la producción de néctar de maracuyá*, evaluó el uso del extracto de Moringa oleífera como coagulante natural para remover la turbiedad de los efluentes líquidos generados por una industria alimentaria dedicada a la producción de néctar de maracuyá. La metodología empleada consistió en pruebas de coagulación-floculación, utilizando la técnica de la prueba de jarras, con distintas concentraciones del extracto de moringa. Se analizaron parámetros como la turbiedad, el pH y la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos. Los resultados mostraron una remoción de turbiedad de entre 92,25 % y 94,16 %, aplicando concentraciones de coagulante de 134,4; 180; 290; 400 y 445,6 mg/L, correspondientes a niveles de turbiedad inicial de 101; 170; 335; 500 y 568 NTU, respectivamente. Asimismo, se observó que la remoción del color del efluente estuvo estrechamente relacionada con la disminución de la turbiedad. El estudio concluye que el extracto de Moringa oleífera representa una alternativa viable, eficiente y ambientalmente sostenible para el tratamiento de aguas residuales en la industria alimentaria. Su uso como coagulante natural podría contribuir significativamente a la reducción de productos químicos sintéticos en los procesos de tratamiento, promoviendo así prácticas más ecológicas y responsables en el manejo de efluentes industriales.

1.5 Justificación de la investigación

La realidad de la región Cusco, inferida del informe de la Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria (DIGESA) y el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (DATASS, 2024) sobre los sistemas de agua y PTAP, que condicionan al consumo de agua no segura en amplios sectores de la población, principalmente rural.

Así mismo, se sustenta en sendos estudios científicos, sobre el sulfato de aluminio como coagulante y floculante químico, que no obstante, mostrar una alta eficiencia en la remoción de la turbiedad del agua, también es evidente, que presenta serios riesgos para la salud y el medio

ambiente, al modificar el pH, la conductividad eléctrica e incorporar trazas de aluminio al cuerpo del agua potable, así como, precipitar en los decantadores, lodos altamente tóxicos por su contenido de hidróxido de aluminio, constituyendo un grave riesgo para el medio ambiente, además de ser difícil y costoso su disposición final segura.. Esta realidad, así como la natural inquietud científica, ambiental y social, motivan la presente investigación, buscando una alternativa, accesible, eficiente, eficaz y sostenible al uso del sulfato de aluminio como coagulante de la turbiedad del agua.

La presente investigación, se propone evaluar y determinar en qué medida, la harina de haba cruda (*Vicia faba* L.) como coagulante y floculante natural, puede degradar el nivel de la turbiedad del agua, permitiendo superar o mitigar los efectos nocivos del sulfato de aluminio sobre el medio ambiente y la salud. En concreto, se propone el uso de la harina de haba (*Vicia faba* L.) INIA 409 – “MUNAY ANGÉLICA”, como coagulante natural, producto abundante en la sierra sur, barato, sostenible y biodegradable, que considero suficiente justificación para esta investigación.

Desde el punto de vista social y ambiental, el uso de coagulantes naturales en el tratamiento de agua puede redundar en las siguientes ventajas:

- Mejoría de la salud pública: Los coagulantes naturales, mejoran la calidad del agua potable, al disminuir la carga de contaminantes y patógenos, y con ello la reducción de las enfermedades transmitidas por el agua, además de la ausencia de trazas de aluminio en el agua potable.
- Accesibilidad y sostenibilidad: Los coagulantes naturales, como la harina de haba (*Vicia faba* L.) resultan más accesibles y sostenibles, por su menor costo frente a los coagulantes químicos tradicionales, particularmente en los sectores más vulnerables de los andes.

- Menor impacto ambiental: El uso de coagulantes naturales, reduce el impacto ambiental asociado con el uso de productos químicos sintéticos, puesto que los lodos precipitados en los decantadores son biodegradables y de fácil disposición final y que pueden ser utilizados incluso como fertilizantes.
- Concienciación de la comunidad: La implementación de tecnologías de tratamiento de agua con coagulantes naturales, puede ser usado como herramienta educativa para concienciar a las comunidades, sobre la importancia de la conservación del agua y el uso sostenible de los recursos naturales.
- Mayor equidad: La disponibilidad y uso de coagulantes naturales puede contribuir a una mayor equidad en el acceso al agua segura y potable, especialmente en comunidades desfavorecidas, promoviendo un desarrollo más justo y sostenible.
- Influencia en políticas públicas: Al ser evidente el beneficio del uso de coagulantes naturales en el tratamiento de agua, esto puede servir de base, para que los gobernantes formulen políticas públicas que prioricen métodos sostenibles y respetuosos con la salud y el medio ambiente.
- Impacto en la agricultura: El uso de coagulantes naturales, puede incentivar la ampliación de la frontera agrícola, con la finalidad de aumentar el volumen de producción de haba, para atender la mayor demanda, lo que a su vez significaría una mejora económica de los agricultores.

1.6 Limitaciones de la investigación

Las principales limitaciones de esta investigación fueron:

- La disponibilidad de laboratorio y adecuado equipamiento, particularmente de la universidad pública, en este caso particular, de la Universidad Nacional San Antonio Abad de Cusco, que está destinada principalmente a la investigación formativa o atención de trabajo de estudiantes de pregrado, sin laboratorios acreditados.

- La aplicación de metodologías innovadoras en las Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) en Cusco, es resistido, por la cultura consuetudinaria del uso de coagulantes y floculantes sintéticos.
- El uso de un producto alimenticio como insumo para el tratamiento del agua, genera cuestionamientos desde un enfoque cultural o ético. Superar estas barreras requerirá procesos de sensibilización, validación técnica y adaptación normativa en el futuro

1.7 Objetivos de la investigación

1.7.1 Objetivo general

- Determinar, en qué medida, la harina de haba (*Vicia faba* L.), como coagulante y floculante natural, permite degradar significativamente el nivel de la turbiedad del agua.

1.7.2 Objetivos específicos

- Determinar, el proceso de preparación de la solución coagulante y floculante natural, con harina de haba (*Vicia faba* L.) para la degradación significativa de la turbiedad del agua.
- Determinar, el efecto de la solución coagulante y floculante natural, preparado con harina de haba (*Vicia faba* L.) en la degradación significativa de la turbiedad del agua.
- Determinar, la dosificación óptima de la solución de harina de haba (*Vicia faba* L.), para la coagulación y floculación en la degradación significativa de la turbiedad del agua.

1.8 Hipótesis

1.8.1 Hipótesis general

La harina de haba (*Vicia faba* L.) como coagulante y floculante natural, permite la degradación significativa de la turbiedad del agua, Cusco-Perú, 2024

1.8.2 *Hipótesis específicas*

- El proceso de preparación adecuada de la solución coagulante y floculante natural, con harina de haba cruda (*Vicia faba* L.), influye en la degradación significativa de la turbiedad del agua, Cusco-Perú, 2024
- El efecto de la solución coagulante y floculante natural, preparada con harina de haba cruda (*Vicia faba* L.) es la degradación significativa de la turbiedad del agua, Cusco-Perú, 2024,
- La dosificación óptima de la solución coagulante y floculante, preparada con harina de haba cruda (*Vicia faba* L.), permite degradar significativamente la turbiedad del agua, Cusco-Perú, 2024

II. Marco teórico

2.1 Bases teóricas

El agua es un recurso vital e insustituible para el sostenimiento de la vida y el equilibrio de los ecosistemas. Su conservación, tratamiento y uso eficiente constituyen componentes fundamentales para garantizar la salud pública, la seguridad alimentaria y el desarrollo sostenible. En este sentido, el estudio riguroso de los principios teóricos, los fundamentos científicos y las experiencias acumuladas en torno al manejo del recurso hídrico es esencial para abordar problemáticas específicas como la reducción de la turbiedad.

2.1.1 *El agua*

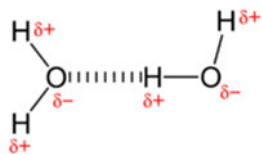
El agua (H_2O) es el compuesto químico más abundante en la superficie terrestre, cubriendo aproximadamente el 71 % del planeta, principalmente en forma líquida en océanos, ríos, lagos y humedales, aunque también está presente como vapor en la atmósfera y como hielo en glaciares, regiones polares y zonas de alta montaña. Su distribución y estado físico están regulados por el ciclo hidrológico, un proceso continuo de evaporación, condensación, precipitación e infiltración que garantiza la renovación natural del recurso.

Desde una perspectiva biofísica, el agua es indispensable para la vida, ya que participa directamente en la mayoría de los procesos bioquímicos y fisiológicos de los organismos vivos, y desempeña un rol estructural y funcional en los ecosistemas. Actúa como medio para el transporte de nutrientes, facilita reacciones metabólicas, regula la temperatura y permite la excreción de desechos metabólicos. En los ecosistemas, interviene en los flujos de energía y en la dinámica de los nutrientes, además de influir en la estabilidad climática y en la productividad primaria.

Químicamente, la molécula de agua está compuesta por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (H_2O), unidos mediante enlaces covalentes. La geometría angular de la molécula

(104,5°) y la diferencia de electronegatividad entre los elementos confieren al agua una naturaleza polar.

Polaridad de la molécula del agua



Esta polaridad, permite la formación de enlaces por puente de hidrógeno entre moléculas adyacentes, fenómeno responsable de varias de sus propiedades fisicoquímicas inusuales, como su elevada tensión superficial, su alto calor específico, su punto de ebullición relativamente elevado y, en particular, su gran capacidad como disolvente.

Gracias a su capacidad para disolver compuestos polares e iónicos, el agua es conocida como el *disolvente universal*. Esta propiedad le permite movilizar sustancias inorgánicas y orgánicas tanto en medios biológicos como ambientales, facilitando procesos esenciales como la circulación de nutrientes en plantas, animales y sistemas acuáticos (Organización Panamericana de la Salud [OPS] & Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente [CEPIS], 2008; Barrenechea, 2008).

Uno de los parámetros fundamentales en la caracterización de la calidad del agua es el potencial de hidrógeno (pH), que expresa la concentración de iones hidronio (H_3O^+) presentes en solución. En aguas naturales superficiales y el agua potable, los valores de pH suelen situarse entre 6,5 y 8,5, un intervalo compatible con la mayoría de las formas de vida acuática. Las aguas subterráneas presentan una variabilidad mayor, condicionada por la mineralogía del acuífero y la presencia de dióxido de carbono disuelto (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2017; United States Environmental Protection Agency [EPA], 2022). Desviaciones significativas del pH óptimo pueden alterar la biodisponibilidad de nutrientes, incrementar la toxicidad de metales pesados como el cadmio o el plomo, y afectar negativamente a los organismos acuáticos.

En este marco, la alcalinidad del agua - entendida como su capacidad para neutralizar ácidos - cumple una función crítica como sistema amortiguador (buffer) frente a cambios bruscos en el pH. Los principales componentes responsables de esta propiedad son los iones bicarbonato (HCO_3^-), carbonato (CO_3^{2-}) y, en menor proporción, los iones hidróxido (OH^-). La alcalinidad contribuye a la estabilidad química del medio acuático y, por tanto, a la resiliencia ecológica de los ecosistemas hídricos (Jenkins, 1987).

En cuanto a su relación con la salud humana, el agua es esencial para el funcionamiento fisiológico: permite el transporte de nutrientes, regula la temperatura corporal mediante la transpiración y facilita la eliminación de metabolitos tóxicos a través del sistema excretor. Sin embargo, el consumo de agua contaminada representa un riesgo significativo para la salud pública. La presencia de patógenos, metales pesados o compuestos orgánicos persistentes pueden ocasionar enfermedades infecciosas o crónicas, cuyos efectos pueden ser reversibles o irreversibles, dependiendo de la naturaleza, concentración y tiempo de exposición a los contaminantes (OPS & CEPIS, 2008; Barrenechea, 2017).

2.1.2 Agua potable.

El agua potable es aquella que, tras ser sometida a procesos de tratamiento y verificación de calidad, cumple con criterios estrictos de calidad microbiológica, fisicoquímica y sensorial, garantizando su seguridad para el consumo humano sin representar riesgos sanitarios. Su calidad debe estar en conformidad con los estándares establecidos por organismos internacionales, como la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), así como con las normativas técnicas de cada país.

Para que un recurso hídrico pueda considerarse apto para el consumo humano, debe cumplir con los siguientes requisitos fundamentales:

- **Calidad microbiológica:** El agua debe estar libre de microorganismos patógenos, como bacterias, virus y protozoarios, responsables de enfermedades gastrointestinales y

sistémicas. Un parámetro crítico de evaluación es la ausencia total de *Escherichia coli* en 100 mL de muestra, lo que constituye un indicador inequívoco de contaminación fecal reciente (OMS, 2017).

- **Calidad química:** El agua no debe contener concentraciones perjudiciales de contaminantes químicos. Estos incluyen metales pesados [como Plomo (Pb), Mercurio (Hg), Cadmio (Cd), Arsénico (As), Aluminio (Al)], aniones inorgánicos (nitratos, nitritos, cloruros, fluoruros y sulfatos], así como residuos de origen industrial y agrícola (pesticidas, compuestos orgánicos volátiles, y subproductos de la desinfección como los trihalometanos). Además, el pH debe mantenerse entre 6,5 y 8,5 para prevenir efectos corrosivos o incrustaciones en redes de distribución. La dureza total, medida como CaCO_3 , no debe superar los 500 mg/L, tanto para evitar sabores metálicos como para proteger electrodomésticos e infraestructura hidráulica, en *Guidelines for Drinking-water Quality* (GDWQ) de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2017, 2022)
- **Calidad física y sensorial:** Desde el punto de vista organoléptico, el agua potable debe ser incolora, inodora e insípida. Físicamente, debe presentar una turbidez inferior a 5 unidades nefelométricas (NTU), y su temperatura debe mantenerse entre 10 y 25 °C para garantizar su aceptabilidad y minimizar el crecimiento microbiológico (OMS, 2017, 2022).
- **Composición benéfica:** Ciertas concentraciones de minerales como el calcio (Ca^{2+}) y el magnesio (Mg^{2+}) son consideradas beneficiosas para la salud humana. Estos cationes contribuyen al equilibrio electrolítico, la salud ósea y cardiovascular, y mejoran las propiedades sensoriales del agua. Su presencia, por tanto, es deseable dentro de los rangos seguros.
- **Alta capacidad calorífica específica:** Es una propiedad físico química relevante, puesto que el agua tiene una capacidad calorífica específica de aproximadamente 4,18 kJ/kg·K, lo que significa que se requiere una gran cantidad de energía para elevar su temperatura. Esta

propiedad le permite actuar como un eficiente regulador térmico en sistemas biológicos y ambientales, contribuyendo a la estabilidad térmica del clima y de los organismos vivos.

- **Densidad anómala en estado sólido:** A diferencia de la mayoría de las sustancias, el agua en estado sólido (hielo) presenta una densidad menor que en estado líquido, con un valor aproximado de 917 kg/m^3 frente a los $1\,000 \text{ kg/m}^3$ del agua líquida a 4°C . Esto provoca que el hielo flote sobre el agua, formando una capa superficial que actúa como aislante térmico. Esta propiedad es crucial para la supervivencia de los ecosistemas acuáticos, ya que protege las capas inferiores del enfriamiento extremo y permite que la vida subsista bajo el hielo durante el invierno.

Dado que las fuentes naturales de agua - ya sean superficiales (ríos, lagos) o subterráneas (acuíferos) - rara vez cumplen con todos los criterios de potabilidad en su estado original, es imprescindible someterlas a procesos de tratamiento. La potabilización comprende etapas sucesivas como coagulación, sedimentación, filtración y desinfección, con el objetivo de eliminar impurezas, patógenos y compuestos indeseables, garantizando así la inocuidad del recurso hídrico (Kiely, 1999).

En consecuencia, el acceso a agua potable segura es una condición esencial para la salud pública, la prevención de enfermedades y el bienestar general. Por ello, el control riguroso y periódico de su calidad constituye una responsabilidad crítica para las autoridades sanitarias y ambientales.

2.1.3 Impurezas en las fuentes de aguas superficiales.

Las impurezas más comunes, en el cuerpo de las aguas superficiales, pueden ser:

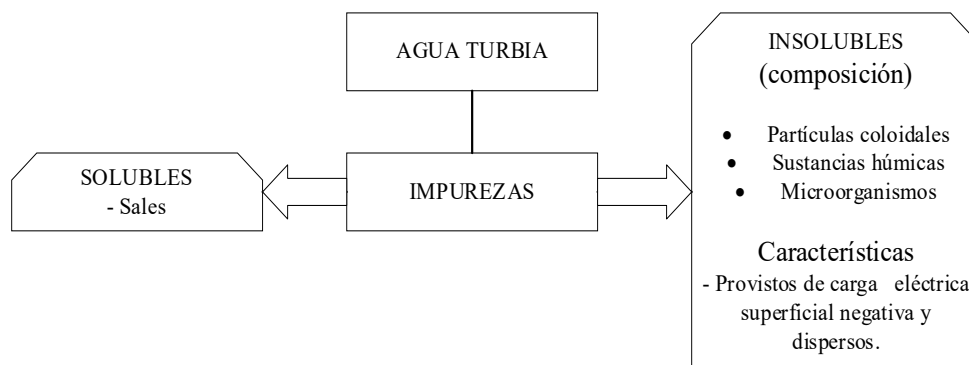
- Sólidos suspendidos, normalmente con tamaños superiores a 10^{-6} m ($1 \mu\text{m}$), de origen mineralógico como las arcillas, arenas, etc., o de origen orgánico, producto de la descomposición de plantas y animales. También pueden estar constituidos por

microorganismos (bacterias, plancton, algas y virus). Estos sólidos suspendidos causan la turbidez y color del agua (Vargas & Romero, 2006).

- Partículas coloidales entre 10^{-6} (μm) y 10^{-9} m (nm), son sólidos suspendidos, cuyo origen es similar a los anteriores, pero con un tamaño inferior y una velocidad de sedimentación muy lenta. Estas partículas, son responsables de la turbiedad y color del agua (Vargas & Romero, 2006), y al estar generalmente con carga negativa superficial por la presencia de grupos RCOO^- y OH^- , están sujetos a fuerzas de repulsión entre las partículas, impidiendo la aglomeración y formación de partículas más grandes que pudieran sedimentar por acción de la gravedad.
- Sustancias disueltas (menores de 10^{-9}m); usualmente sustancias inorgánicas, como cationes y aniones y sustancias orgánicas, como ácidos, alcoholes y aldehídos, entre otros. También puede haber gases disueltos (Vargas & Romero, 2006).

2.1.4 El agua turbia.

Se denomina agua turbia a aquella que contiene sólidos suspendidos, tanto solubles como insolubles, en su masa. Los componentes insolubles suelen encontrarse en forma de coloides, los cuales presentan, en su mayoría, cargas eléctricas negativas. Esta composición afecta significativamente la transparencia del agua, dándole una apariencia opaca y coloraciones que varían entre tonos cafés, verdosos o blanquecinos. Por lo general, el agua turbia también presenta olores y sabores desagradables, lo que la hace no apta para el consumo humano (Barrenechea, 2008).

Figura 2*Agua turbia y sus impurezas*

El agua turbia, como se observa en la figura 2, presenta dos categorías principales de contaminantes: solubles e insolubles.

- Los contaminantes solubles están conformados principalmente por sales inorgánicas como el sodio (Na^+) y el cloruro (Cl^-), que se disuelven completamente en el medio acuoso.
- Los contaminantes insolubles incluyen coloides y partículas en suspensión, tales como material particulado, microorganismos patógenos y compuestos químicos no solubles. Además, se encuentran presentes las sustancias húmicas, derivados orgánicos de la descomposición vegetal, que contribuyen a la coloración y reactividad del agua (Charapaqui, 2023). Estos componentes insolubles, representan el principal objetivo de los procesos de coagulación y floculación, técnicas fundamentales en el tratamiento de aguas para facilitar su remoción mediante sedimentación o filtración.

2.1.5 La turbiedad del agua

La turbiedad del agua, se manifiesta como la pérdida de transparencia, pérdida que es producto de la presencia de sólidos suspendidos en el cuerpo del agua (arcillas, sales metálicas, materias orgánicas e inorgánicas, plancton, bacterias, entre otros) generalmente en forma de partículas coloidales, dotadas de carga eléctrica negativa principalmente, estas cargas eléctricas producen repulsión electrostática, de acuerdo a la ley de Coulomb, manteniéndolos dispersos

en forma permanente, en tanto no aparezca una fuerza desestabilizadora de este equilibrio. El efecto macroscópico inmediato de la turbiedad es la pérdida de transparencia y aceptabilidad por la comunidad (Marco et al., 2004)

La turbiedad, es una medición óptica, y universalmente, se mide en Unidades Nefelométricas de Turbiedad (NTU), utilizando un turbidímetro, también se puede expresar en Unidades de Turbiedad (UNT) y en Formas de Turbiedad de Fischer (FTU).

Las NTU han sido estandarizadas por la Agencia de Protección Ambiental (EPA-EEUU) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) de la siguiente manera

Tabla 1

Turbiedad del agua.

Organización	Agua para consumo humano Valores recomendados	Valor guía
EPA	= 1 NTU < 5NTU	- -
OMS	< = 1NTU	5 NRU

Nota: Adaptado de Guías para la calidad del agua potable, 4.^a edición. Ginebra.

Organización Mundial de la Salud (2011).

La tabla 1, muestra que la EPA, recomienda que la turbidez del agua para consumo humano puede alcanzar hasta una NTU, mientras que la OMS, recomienda que idealmente debe ser menor o igual a una NTU, pero eventualmente podría alcanzar hasta cinco NTU. Esta restricción busca una mayor eficacia en la desinfección y reducir el riesgo de patógenos.

El instrumento utilizado para medir la turbiedad del agua es el nefelómetro o turbidímetro, que mide la intensidad de la luz dispersada a 90°, cuando un rayo de luz atraviesa una muestra de agua (Baños, 2018)

La metodología convencional empleada para la remoción de la turbiedad en el tratamiento de agua consiste en una secuencia de procesos físico-químicos: coagulación, floculación, sedimentación y filtración, seguidos de una etapa indispensable de desinfección. Aunque esta metodología es técnicamente sencilla, representa uno de los componentes que más

influye en el costo de producción del agua potable, debido al uso constante de insumos químicos (Barrenechea, 2008).

Los principales efectos, características y causas de la turbidez pueden resumirse de la siguiente manera:

- Impacto en la calidad del agua: La turbidez reduce la transparencia del agua, dificultando los procesos de desinfección y afectando los ecosistemas acuáticos al limitar la penetración de la luz solar, lo que interfiere con la fotosíntesis de las plantas acuáticas.
- Riesgos para la salud humana: La turbidez suele estar asociada a la presencia de partículas que pueden portar microorganismos patógenos, nutrientes y otros contaminantes, representando un riesgo significativo para la salud, especialmente cuando el agua se destina al consumo humano o a actividades recreativas.
- Causas de la turbidez: Su origen puede ser natural o antropogénico. Entre las causas naturales se incluyen la erosión, las lluvias intensas, los deslizamientos y la escorrentía superficial. Las fuentes antropogénicas comprenden prácticas agrícolas intensivas, deforestación, actividades de construcción, vertidos industriales y la descarga de aguas residuales sin tratamiento previo en cuerpos de agua.

A nivel global, la mayoría de los países han adoptado normas y estándares de calidad del agua que establecen límites máximos permisibles de turbidez, especialmente en el agua destinada al consumo humano. Para asegurar el cumplimiento de estos estándares, se realizan evaluaciones periódicas en fuentes de agua como ríos, lagos y reservorios, con el fin de proteger tanto el medio ambiente como la salud pública.

En este contexto, el conocimiento detallado de las características, causas y consecuencias de la turbidez resulta fundamental para la gestión sostenible y responsable de las fuentes hídricas.

2.1.6 Las partículas coloidales en el agua

Las partículas coloidales presentes en el agua poseen dimensiones típicamente comprendidas entre 1 nanómetro (nm) y 1 micrómetro (μm), es decir, entre 1 y 1000 milimicras (Andía, 2000). Su comportamiento físico-químico depende en gran medida de su origen (natural o antropogénico), composición y estructura superficial.

Desde el punto de vista de su interacción con el medio acuoso, los coloides se clasifican en dos grandes grupos: hidrofóbicos, que tienden a repeler el agua, e hidrofílicos, que presentan afinidad por ella. Esta clasificación es fundamental, ya que influye en la estabilidad del sistema coloidal y, por ende, en la estrategia de tratamiento requerida.

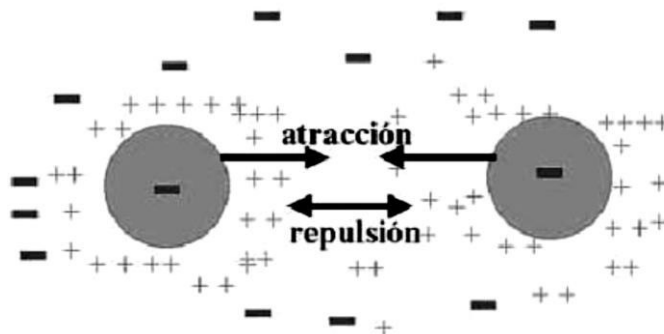
Los coloides pueden estar constituidos por una amplia variedad de materiales, incluyendo materia orgánica disuelta o particulada, óxidos metálicos, arcillas, sales minerales, microorganismos y metales pesados. Estas partículas, debido a su tamaño y carga superficial, presentan una elevada estabilidad coloidal, lo que dificulta su remoción por métodos físicos convencionales como la sedimentación simple.

Su comportamiento está determinado por múltiples propiedades, entre las que destacan las cinéticas (movilidad y difusión), ópticas (dispersión de la luz), interfaciales (energía superficial) y electrocinéticas (como el potencial zeta), las cuales son clave para entender su respuesta frente a procesos como la coagulación (Barrenechea, 2008).

En aguas superficiales, las partículas coloidales están comúnmente presentes como resultado de procesos naturales (erosión, lixiviación, actividad biológica) o actividades antrópicas (descargas industriales, agrícolas y urbanas). Estas partículas, al poseer carga eléctrica negativa en su superficie, se repelen mutuamente mediante fuerzas electrostáticas (efecto conocido como repulsión coloidal), lo que les permite mantenerse en suspensión sin agruparse en flóculos sedimentables (Pérez & Urrea, 2020).

Figura 3

Fuerzas de repulsión y atracción de partículas cargadas eléctricamente.



Nota: Adaptado de *Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación*, por Y. Lorenzo, 2006, *Redalyc*. <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120664002.pdf>

La figura 3, ilustra este fenómeno, mostrando las fuerzas de repulsión entre partículas de igual carga, lo que impide su aglomeración. Para romper esta estabilidad, es necesario introducir en el sistema sustancias con carga opuesta, como los coagulantes (por ejemplo, sales de aluminio o hierro). Estos neutralizan las cargas negativas de los coloides, permitiendo la agregación de las partículas mediante la formación de flóculos, que posteriormente pueden ser separados mediante sedimentación o filtración. Este principio se fundamenta en la Ley de Coulomb, que describe las fuerzas de interacción entre cargas eléctricas opuestas.

2.1.7 El color del agua.

El color del agua, es una variable tanto fisicoquímica como organoléptica de gran relevancia en la evaluación de su calidad, especialmente en contextos de consumo humano, uso ambiental e industrial. Esta característica puede deberse a la presencia de partículas en suspensión - lo que se denomina *color aparente* - o a sustancias disueltas en el agua, conocidas como color verdadero. En muchos casos, el color puede presentarse de manera independiente de la turbidez, aunque ambos parámetros suelen estar relacionados.

La composición química exacta de todas las especies responsables del color en el agua, aún no ha sido completamente identificadas. Sin embargo, se ha atribuido principalmente a la presencia de compuestos orgánicos naturales como taninos, ligninas, ácidos húmicos y fúlvicos,

originados por la descomposición de materia vegetal en cuencas hidrográficas (Barrenechea, 2008). Además, pueden contribuir otras sustancias como metales en forma coloidal (por ejemplo, hierro y manganeso), colorantes industriales y subproductos de actividades antropogénicas.

La remoción del color en aguas crudas, se realiza eficazmente mediante procesos de coagulación química, técnica también utilizada para reducir la turbidez. En este tratamiento, se emplean sales metálicas coagulantes, como el sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) o el cloruro férrico FeCl_3 , bajo condiciones controladas de pH ligeramente ácido. Estos compuestos permiten desestabilizar y aglomerar las partículas coloidales responsables del color, facilitando su eliminación posterior por sedimentación o filtración.

Desde una perspectiva sanitaria, el color es un indicador indirecto de la presencia de materia orgánica natural (MON). Una alta concentración de MON representa un riesgo potencial durante los procesos de desinfección con cloro, ya que puede generar subproductos de desinfección (DBPs), como los trihalometanos (THMs), compuestos con propiedades potencialmente carcinógenas (Vaquero & Toxque, 2012).

El color, junto con la turbidez, el olor y el sabor, forma parte del conjunto de parámetros sensoriales esenciales que determinan la aceptabilidad del agua para consumo humano. En este sentido, la Organización Mundial de la Salud (OMS), a través de la Organización Panamericana de la Salud (OPS/CEPIS), ha establecido un valor guía de 15 Unidades de Color (UC) como límite máximo recomendable para agua potable.

2.1.8 Coagulantes de la turbidez del agua

Los coagulantes son sustancias químicas, de origen inorgánico u orgánico, que, al ser aplicadas en dosis adecuadas al agua con turbidez, reaccionan con las partículas suspendidas principalmente coloides, desestabilizándolas para favorecer su aglomeración y posterior

sedimentación. Este proceso permite la formación de microflocúlos, que evolucionan hacia macroflocúlos más densos y sedimentables (Andía, 2000).

La selección del tipo de coagulante, depende de múltiples factores, como el pH del agua, la naturaleza de la materia en suspensión, la temperatura y la concentración de sólidos. En general, los coagulantes se clasifican en dos grandes grupos: inorgánicos y orgánicos.

2.1.8.1 Coagulantes inorgánicos:

Estos coagulantes actúan mediante la formación de hidróxidos metálicos con carga positiva, que neutralizan la carga negativa de las partículas coloidales. Son los más utilizados en el tratamiento convencional de aguas potables y residuales.

- Sulfato de Aluminio o Alumbre ($\text{Al}_2 (\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$): Conocido comúnmente como alumbre, es el coagulante inorgánico más empleado en plantas de tratamiento de agua. Al disolverse en agua, se hidroliza y forma especies de aluminio y un gel de hidróxido de aluminio con gran capacidad para adsorber y atrapar partículas coloidales.
- Cloruro férrico (FeCl_3): Es un coagulante altamente eficaz, especialmente en aguas con alta turbiedad y amplio rango de pH. Genera flocúlos más densos y sedimentables en comparación con el alumbre.
- Policloruro de aluminio (PAC): Es un coagulante pre hidrolizado con mayor estabilidad y eficiencia que el sulfato de aluminio. Es ampliamente utilizado tanto en la potabilización del agua como en el tratamiento de aguas residuales, por su capacidad para eliminar la turbiedad, sólidos suspendidos y contaminantes orgánicos.
- Sulfato ferroso (FeSO_4): Similar en función al cloruro férrico, aunque menos frecuente en tratamientos de agua potable. Es más utilizado en condiciones donde se requiere una fuente adicional de hierro o en ciertos tratamientos biológicos.

2.1.8.2 *Coagulantes orgánicos:*

Los coagulantes orgánicos son compuestos de alto peso molecular que actúan principalmente como auxiliares de coagulación y floculación. Su uso suele combinarse con coagulantes inorgánicos para mejorar la eficiencia del proceso.

- **Polímeros sintéticos:** Son moléculas de estructura lineal o ramificada que pueden ser catiónicos, aniónicos o no iónicos, según el tipo de carga. A bajas concentraciones, mejoran la formación de flóculos, aceleran la sedimentación y reducen el consumo de coagulantes inorgánicos.
- **Extractos naturales:** Sustancias como las proteínas y polifenoles extraídos de plantas (por ejemplo, semillas de moringa, taninos vegetales, cactus, entre otros) han demostrado propiedades coagulantes efectivas, especialmente en contextos rurales o en tecnologías apropiadas. Estos coagulantes naturales son biodegradables, de bajo costo y ambientalmente sostenibles.

2.1.8.3 *Coagulación / floculación de los coloides del agua*

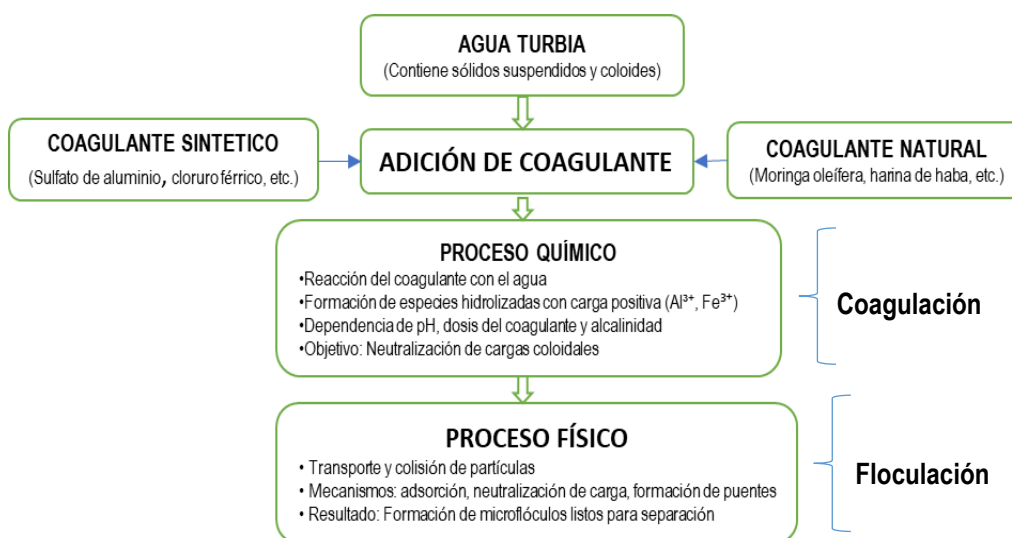
La coagulación-floculación es un proceso fisicoquímico fundamental en el tratamiento de aguas superficiales y residuales. Su objetivo es transformar partículas coloidales finas y estables - como arcillas, bacterias, virus y materia orgánica - en agregados de mayor tamaño y peso, que puedan ser eliminados mediante procesos físicos posteriores, como la sedimentación o la filtración.

La etapa de coagulación consiste en la desestabilización de los coloides, que en su mayoría presentan cargas negativas en la superficie. Al introducir coagulantes cargados positivamente (cationes metálicos), se neutralizan las fuerzas de repulsión electrostática que impiden la unión entre partículas. Esto facilita su aglomeración por colisión y atracción mutua, dando lugar a microfloculos.

En la etapa de floculación, mediante una agitación suave y controlada, los microflóculos se agrupan formando macroflóculos más grandes y densos, que pueden sedimentar por gravedad debido a su masa superior al agua (Andía, 2000). Este proceso se guía por principios de interacción coloidal, hidrodinámica y química superficial.

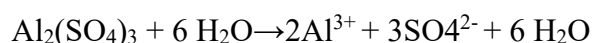
Figura 4

Diagrama del proceso de coagulación/floculación

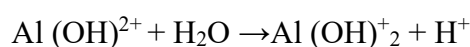


La Figura 4, ilustra la secuencia del proceso de coagulación aplicado al tratamiento de agua turbia, mediante el uso de coagulantes, ya sean sintéticos o de origen natural. Este proceso ocurre en dos etapas sucesivas: una etapa química inicial (hidrólisis del coagulante) y una etapa física posterior (aglomeración y sedimentación), tal como se puede observar a continuación, si se utilizara sulfato de aluminio:

El sulfato de aluminio se disuelve en agua:



Los iones de aluminio (Al^{3+}) se hidrolizan:



$\text{Al}(\text{OH})_3 \downarrow$, Este compuesto químico, es un sólido gelatinoso que atrapa impurezas y microorganismos y precipita.(OMS, 2017/2022)

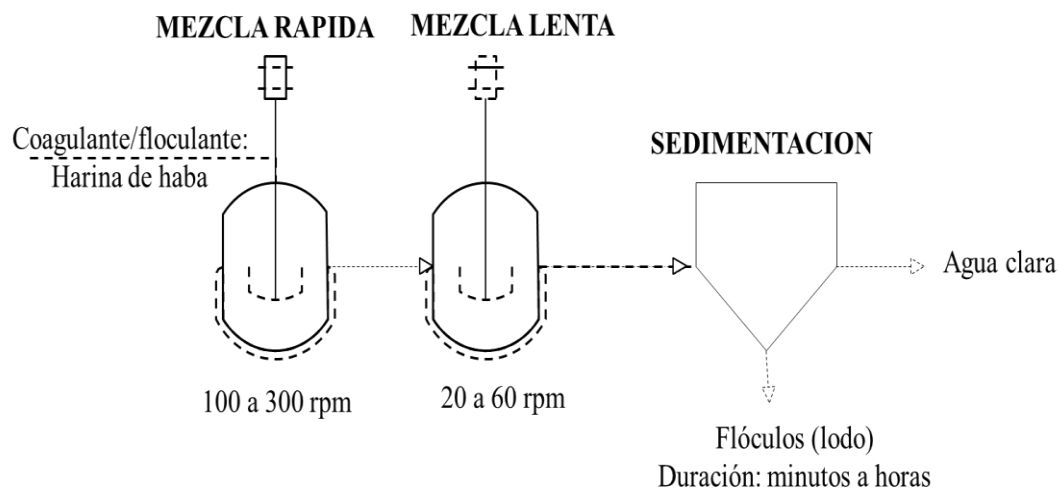
Las partículas coloidales presentes en el agua, suelen poseer carga eléctrica negativa, atribuible a la presencia de grupos funcionales en su superficie, principalmente carboxilos ($-\text{COO}^-$) e hidroxilos ($-\text{OH}^-$). Estos grupos se originan tanto en la descomposición de materia orgánica natural, como los ácidos húmicos y fúlvicos, como de la transformación de materiales inorgánicos, tales como arcillas y óxidos metálicos. Esta carga superficial negativa genera una repulsión electrostática entre las partículas, manteniéndolas dispersas en el medio acuoso y evitando su aglomeración y sedimentación espontánea (Kelderman & Kruis, 2001).

Durante la primera fase del proceso de coagulación, se adiciona un coagulante cargado positivamente - por ejemplo, sales metálicas como el sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) o el cloruro férrico (FeCl_3) - que, al hidrolizarse en el agua, forman especies poliméricas con alta densidad de carga. Estas especies interactúan con las superficies coloidales mediante adsorción iónica y son estabilizadas por fuerzas de Van der Waals, enlaces electrostáticos y formación de complejos con los grupos funcionales. Este fenómeno induce la neutralización de cargas, disminuyendo la energía de repulsión entre partículas y favoreciendo su acercamiento. Como resultado, se inicia la formación de microfloculos, que en la segunda etapa del proceso - de naturaleza física - se agrupan por colisión y transporte en el medio líquido, dando origen a flóculos de mayor tamaño y masa, susceptibles de ser removidos por sedimentación o filtración. Este mecanismo de desestabilización coloidal es fundamental para la eliminación eficiente de la turbiedad, materia orgánica disuelta y otros contaminantes asociados a partículas finas en el tratamiento del agua.

2.1.9 Coagulación, floculación y sedimentación

Figura 5

Coagulación, floculación y sedimentación



La Figura 5, ilustra el esquema general de las etapas del proceso de clarificación del agua turbia, el cual comprende las etapas secuenciales de coagulación, floculación y sedimentación. Este proceso tiene como objetivo principal la remoción de partículas coloidales y sólidos en suspensión, contribuyendo a la mejora de la calidad del agua antes de su potabilización o descarga.

2.1.9.1 Coagulación

La coagulación es un proceso fisicoquímico fundamental en el tratamiento del agua, cuyo propósito es desestabilizar las partículas coloidales suspendidas en el agua cruda. Esto se logra mediante la adición de sustancias químicas denominadas coagulantes, que reaccionan con los coloides y neutralizan sus cargas eléctricas superficiales. Al perder su repulsión electrostática, las partículas pueden acercarse y formar micro agregados conocidos como microflóculos.

— Mezcla rápida (rapid mix):

Esta etapa se realiza bajo condiciones de agitación intensa (entre 100 y 300 rpm), durante un tiempo corto, típicamente entre 10 y 30 segundos. Su función principal es asegurar la

dispersión homogénea del coagulante en todo el volumen del agua, iniciando la neutralización de las cargas eléctricas de las partículas suspendidas. La eficiencia de esta fase depende de diversos factores fisicoquímicos, tales como el pH, temperatura, alcalinidad, turbidez, color verdadero, concentración de sólidos disueltos totales (TDS), así como la distribución y naturaleza de los coloides presentes.

— **Mezcla lenta (floculación):**

También conocida como **floculación**, esta etapa consiste en una agitación controlada de menor intensidad (entre 20 y 30 rpm), durante un período más prolongado, usualmente de 20 a 30 minutos. Su objetivo es propiciar el crecimiento de los microflóculos mediante colisiones suaves entre partículas, favoreciendo la formación de macroflóculos, estructuras de mayor tamaño, peso y densidad, capaces de sedimentar de forma eficiente en la siguiente etapa del proceso.

2.1.9.2 Sedimentación

Finalizada la etapa de floculación, el agua entra en un periodo de reposo, en el que los flóculos formados sedimentan por efecto de la gravedad, en función de su densidad y tamaño. El tiempo de sedimentación puede variar, generalmente entre 30 y 90 minutos, dependiendo de las características del sistema. En algunos casos, este proceso puede ser complementado con decantación acelerada, flotación o filtración rápida, según el diseño de la planta de tratamiento y la calidad del agua tratada (Andía, 2000).

2.1.9.3 Solución coagulante.

Es una solución preparada, utilizando productos químicos como el sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$), aluminato de sodio (NaAlO_2), sulfato ferroso (FeSO_4), cloruro férrico (FeCl_3), sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), todos ellos, disponibles en el mercado (Vargas, 2004), siendo el más empleado en la zona de estudio, el sulfato de aluminio.

Para efectos de la presente investigación, esta solución se preparó con harina de haba cruda (*Vicia faba* L.) y agua destilada.

2.1.10 Degradación de la turbidez del agua.

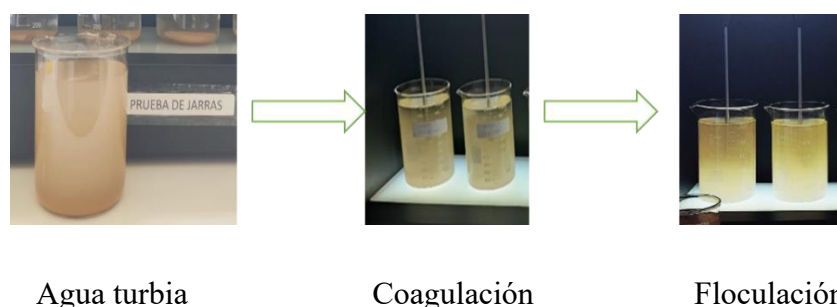
La degradación de la turbidez del agua es producto de la coagulación de los coloides, utilizando un coagulante sintético, como el sulfato de aluminio, seguido de la floculación, que consiste en la aglomeración y formación de los flóculos, para luego sedimentar, decantar y/o filtrar los sedimentos producidos, con lo que se remueve la turbiedad, recuperando el agua su transparencia y aceptabilidad estética (Barrenechea, 2008).

2.1.10.1 Floculación y flóculos

Es un proceso químico, provocado por la adición de sustancias denominadas floculantes, que ayudan a aglutinar las partículas coloidales presentes en el agua, conocidas como flóculos, las que precipitan por gravedad, para su posterior filtración. (Barrenechea, 2008).

Figura 6

Coagulación/floculación del agua turbia



La figura 6, muestra la secuencia en el proceso de clarificación del agua, corresponde a imágenes de la experiencia realizada para el presente estudio en laboratorio.

La floculación, es un proceso que sigue a la coagulación y agitación rápida, para ese fin, la masa de agua coagulada es agitada mecánicamente en forma lenta, acercando los flóculos entre sí, provocando los enlaces por adsorción y por fuerzas de Van der Waals, propiciando el crecimiento y aglomeración de los flóculos, este aumento de tamaño lo hace sensible a la gravedad, iniciándose la sedimentación. En esta etapa, el mezclado necesariamente es lento,

puesto que una mezcla rápida podría romper los flóculos, los que raramente vuelven a juntarse. Este proceso, puede ser mejorada con la adición de un reactivo de floculación o ayudante de floculación sintético o natural.

Para este proceso, se prepara la solución coagulante y floculante, utilizando un producto químico sintético o natural, con una determinada concentración, en función de la turbiedad del agua. (Cárdenas, 2000).

El floculo, es un grumo de materia inorgánica y/o orgánica, producto de la aglomeración de los coloides, estos grumos, reciben el nombre de flóculos, los que sedimentan por acción de la gravedad (Cárdenas, 2000)

2.1.10.2 Sedimentación de flóculos

La sedimentación de flóculos, es el proceso físico, mediante el cual, los flóculos formados durante la coagulación/floculación se asientan por gravedad en el fondo de un recipiente o tanque, separándose del agua clara. Para ese fin, el agua floculada se deja en reposo (generalmente de 15 a 60 minutos), los flóculos, al ser más densos que el agua, se precipitan por acción de la gravedad, acumulándose en el fondo del recipiente o tanque de sedimentación, en la parte superior queda el agua clarificada, con menor turbiedad y concentración de sólidos suspendidos, en concreto, es la precipitación de los flóculos formados y aglomerados por acción de la gravedad (Maldonado, 2008).

2.1.11 El Haba (*Vicia faba* L.)

Características y propiedades funcionales del cultivar de haba (*Vicia faba* L.) INIA 409 “Munay Angélica”. Este cultivar, desarrollado por el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) del Perú, presenta atributos agronómicos y fisicoquímicos de interés tanto nutricional como tecnológico, especialmente en el contexto de aplicaciones ambientales como el tratamiento de agua. A continuación, se detallan sus principales características:

- Es una leguminosa adaptada y en plena producción en las provincias cusqueñas de Urubamba, Anta y Canchis, y los departamentos de Ayacucho, Junín, Puno y Lambayeque, con una producción promedio anual de 48 000 Tm de grano seco.
- Tiene rendimiento promedio en grano seco anual de 1,6 a 2 TM/ Ha y un potencial de 4 Tm, presenta un grano de color verde olivo, con hilium verde (Ver anexo A)

Tabla 2*Características del haba (Vicia faba L.) INIA 409*

Características	Medida	Unidad
Tamaño grano seco	Mediano	-
Peso (100 semillas)	120 - 180	g
Rendimiento Potencial (seco)	4	Tm/Ha
Uso grano seco	Harina y otros	-
Color grano	Verde olivo, con hilium verde	-
Proteínas (100 g, en grano)	25	%

Nota: Adaptado de INIA 409 “Munay Angélica” INIA – Cusco. (2023) (Ver Anexo A).

De acuerdo con la Tabla 2, una de las fracciones químicas más relevantes del haba INIA 409 es su alto contenido proteico (~25% en base seca), acompañado por carbohidratos, lípidos y compuestos fenólicos. En particular, las proteínas del haba poseen propiedades funcionales que las hacen potencialmente útiles como agentes coagulantes naturales en medios acuosos. Las proteínas son macromoléculas poli electrolíticas que, en condiciones de pH neutro o ligeramente ácido, presentan carga neta positiva debido a la protonación de grupos amino libres ($-NH_2$). Esta característica catiónica permite que las proteínas del haba interaccionen eficazmente con partículas coloidales cargadas negativamente - como arcillas, materia orgánica y microorganismos - presentes en aguas superficiales turbias.

- Durante este proceso, se produce:
- Neutralización de carga superficial de los coloides,
- Desestabilización del sistema coloidal,

- Y formación de flóculos mediante mecanismos de adsorción y creación de puentes Inter partículas.

Estas proteínas pueden adsorberse en la superficie de partículas suspendidas, actuando como un puente entre ellas y favoreciendo la agregación por reducción de la repulsión electrostática. El resultado es el aumento del tamaño de los agregados y su posterior sedimentación, facilitando su separación del medio líquido.

A pesar del potencial evidente de las proteínas del haba como coagulantes naturales, existe escasa documentación científica sobre su uso específico en tecnologías de tratamiento de agua. La mayoría de estudios disponibles se centran en sus propiedades nutricionales y en su comportamiento funcional en matrices alimentarias (ej. gelatinización, emulsificación). Por lo tanto, se requiere mayor investigación experimental para caracterizar cuantitativa y cualitativamente su eficiencia coagulante, así como su comparación con coagulantes convencionales.

2.1.11.1 Tipos de haba (*Vicia faba* L.)

En términos generales, el haba se presenta en dos tipos:

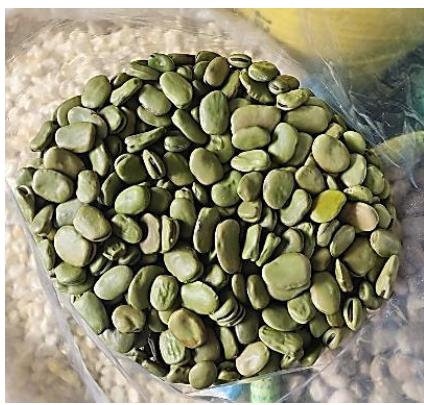
Tabla 3

Tipos de haba (Vicia faba L.)

Clases	Gigante, Mediana, Pequeña, Verde, Blanca, Amarilla, Roja.
	Precoz: “Mahón negra”, “Mahón blanca”
Cultivares	Tardías: “Pacae blanco”, “Pacae verde”, “Amarilla canteña”

Nota: Adaptado de la Revista del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (2024).

<https://www.gob.pe/midagri>

Figura 7*Haba INIA 409 “Munay Angelica”*

La figura 7, muestra el haba INIA 409 “Munay Angelica”, caracterizado por ser de color verde olivo, con hilum también verde y con características agronómicas adecuadas y sostenibles para la región.

2.1.12 Harina de haba

Es la harina preparada por molienda o conminación fina del haba (*Vicia faba* L.), seca y descascarada en molino de discos, y clasificada en cedazo para separar los finos de los gruesos, utilizándose una malla 120 mesh, provisto de Ro-Tap, que permite obtener una harina fina, que es la materia prima para la preparación de la solución coagulante natural.

Figura 8*Preparación de la harina de haba*

Molino de discos

Clasificador de harina con Ro -Tap
Laboratorio de Tecnología FIP -UNSAAC

En la figura 8, se muestra el molino de discos utilizado para moler el haba seca y descascarada, y el cedazo utilizado para separar finos de los gruesos de la harina.

Tabla 4

Composición química y valor nutritivo del haba (Vicia faba L).

Nutrientes	Haba tierra	Haba seca
Calorías	118 kcal	339 kcal
Agua	60 %	12,60 %
Hidratos de carbono	11,7 %	58,30 %
Proteínas	5,60 %	26,12 %
Grasas	0,40 %	2,20 %
Sales	1,00 %	3,00 %
Vitamina A	60 UI	30 UI
Vitamina B (Tiamina)	0,28 mg	0,53 mg
Vitamina B ₂ (riboflavina)	0,17 mg	0,30 mg
Vitamina B ₅ (Niacinina)	1,70 mg	2,50 mg
Vitamina C (AC. Ascorbico)	28,00 mg	6,00mg

Nota. Tomado de National Nutrient Database, por United States Department of Agriculture (USDA), s.f. <https://fdc.nal.usda.gov/>

La tabla 4, muestra la composición química del haba tierna y haba seca. Es importante para el presente estudio la presencia de 26,12 % de proteínas y 58,30% de hidratos de carbono en el haba. Estos polisacáridos, constituyen el principio activo de los coagulantes naturales vegetales, y son polímeros constituidos por monosacáridos, unidos mediante enlaces glucosídicos. Estos polisacáridos naturales, generalmente tienen pesos moleculares elevados y tienen carga eléctrica positiva, y es esta carga eléctrica la que desestabiliza la carga negativa de los coloides, para acercarlos y formar los flóculos en el proceso de coagulación, los enlaces químicos que aparecen al formar los flóculos, se conocen como fuerzas de Van der Waals. Los polisacáridos, generalmente se representan por formulas químicas como $C_x(H_2O)_{x-1}$. Entre los polisacáridos más conocidos están el almidón y la celulosa, todos con aptitud para participar de la coagulación en determinadas condiciones ambientales (Plaza et al., 2013).

2.2 Marco conceptual

— Potencial de Hidrógeno del agua (pH)

Es el criterio utilizado para medir la acidez o alcalinidad del agua. La escala de pH varía de 0 a 14: un valor de 7 indica un pH neutro, valores menores a 7 indican acidez y valores mayores a 7 indican alcalinidad. La medición se realiza mediante un pH-metro o tiras reactivas. Los rangos de aceptabilidad del pH son los siguientes:

- Agua potable: generalmente entre 6.5 y 8.5.
- Agua natural: puede variar entre 6 y 9, dependiendo de las condiciones ambientales y geológicas.
- Acuicultura: entre 6.5 y 8.5, adecuado para la crianza de peces (ver Anexo)

— Conductividad eléctrica del agua ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

La conductividad eléctrica del agua es una medida de su capacidad para conducir corriente eléctrica, la cual depende directamente de la concentración de iones disueltos en el medio. Estos iones pueden provenir de sales, metales y otros compuestos contaminantes presentes en el agua. En función de su nivel de conductividad, el agua puede clasificarse en las siguientes categorías:

- Baja conductividad (0–200 $\mu\text{S}/\text{cm}$): indica agua de buena calidad, con baja concentración de sólidos disueltos.
- Conductividad moderada (200–800 $\mu\text{S}/\text{cm}$): el agua puede ser apta para potabilización, dependiendo de otros parámetros de calidad.
- Alta conductividad (≥ 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$): puede representar un riesgo para la calidad del agua y requiere análisis complementarios para identificar la composición iónica y definir el tratamiento adecuado (ver Anexo 4).

Esta medición, es útil para evaluar la presencia de contaminantes disueltos y estimar la salinidad, especialmente en aplicaciones como el monitoreo ambiental, tratamiento de agua y uso en sistemas agrícolas o industriales.

— Coagulación

La coagulación es un proceso químico fundamental en el tratamiento de aguas, especialmente para la remoción de turbiedad causada por partículas coloidales y material suspendido. Consiste en la desestabilización de los coloides presentes en el agua, los cuales poseen cargas eléctricas superficiales que generan repulsión entre sí y evitan su sedimentación natural.

Mediante la adición de coagulantes —como sales metálicas (por ejemplo, sulfato de aluminio o cloruro férrico) o polímeros cargados— se neutralizan las cargas eléctricas de estos coloides, reduciendo la potencial zeta y colapsando la doble capa eléctrica que los rodea. Este fenómeno permite que las partículas coloidales se acerquen y formen agregados microscópicos o microflóculos. Posteriormente, durante el proceso de floculación, estos microflóculos colisionan y se unen, formando estructuras más grandes y sedimentables llamadas flóculos o macropartículas, que pueden ser eliminadas por sedimentación o filtración (Matilainen et al., 2010).

La eficacia de la coagulación depende de diversos factores, incluyendo el tipo y dosis del coagulante, el pH, la temperatura, la alcalinidad del agua y la intensidad de la mezcla rápida. Este proceso es crucial no solo para mejorar la claridad del agua, sino también para reducir la carga de materia orgánica, microorganismos y contaminantes asociados a las partículas suspendidas.

— Coagulantes

Los coagulantes son sustancias químicas utilizadas en el tratamiento de aguas para desestabilizar y aglomerar partículas coloidales, facilitando su posterior remoción. Pueden ser de origen natural (por ejemplo, extractos de plantas con propiedades coagulantes como la *Moringa oleífera*) o sintético (como las sales de aluminio y hierro).

Estos compuestos poseen grupos funcionales —como carboxilos ($-\text{COO}^-$) o hidroxilos ($-\text{OH}$)— capaces de generar cargas eléctricas opuestas a las de los coloides presentes en el

agua, promoviendo la neutralización de cargas y el colapso de la doble capa eléctrica. Este mecanismo permite que las partículas coloidales se agrupen en microflocúlos, los cuales serán posteriormente transformados en flocúlos más grandes y sedimentables durante el proceso de floculación.

Desde una perspectiva ambiental, el uso de coagulantes naturales o biodegradables es altamente recomendable, ya que reduce la generación de subproductos potencialmente tóxicos, disminuye el impacto ambiental del lodo generado y contribuye a un tratamiento de agua más sostenible y ecológico.

— **Coagulantes/floculantes orgánicos sintéticos**

Son polímeros solubles en agua, constituido por monómeros como la acrilamida y ácido acrílico (C_3H_5NO), ambos compuestos, son utilizados en el tratamiento de aguas, principalmente en forma de polímeros, ambos propician la formación de flocúlos a partir de las partículas en suspensión del agua. La acrilamida, se utiliza principalmente en la forma de poliacrilamida ($(C_3H_5NO)_n$), mientras que el ácido acrílico ($C_3H_4O_2$) puede ser parte de formulaciones que contribuyen a la coagulación y floculación en diversas aplicaciones.

— **Coagulantes/floculantes inorgánicos**

Son compuestos químicos, constituido por sales metálicas, y son los más utilizados en la remoción de la turbiedad del agua superficial y aguas residuales (partículas suspendidas, coloides y otros contaminantes), debido a su rendimiento, disponibilidad y efectividad.

Entre los coagulantes se distinguen al sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3$), cloruro férrico ($FeCl_3$) y sulfato férrico ($Fe_2(SO_4)_3$) y floculantes a base de aluminio.

— **Coagulantes/floculantes naturales**

Los coagulantes y floculantes naturales, principalmente de origen vegetal, han sido ampliamente investigados como alternativas sostenibles a los coagulantes metálicos

tradicionales. Diversos estudios han demostrado su eficacia en la remoción de turbiedad y color en el tratamiento de aguas, destacando su bajo impacto ambiental, biodegradabilidad y menor generación de lodos químicos.

— **Floculación**

La floculación es un proceso fisicoquímico que sigue a la coagulación y consiste en la aglomeración de partículas coloidales desestabilizadas, formando flóculos con peso específico mayor al del agua, facilitando su sedimentación. Este proceso es esencial para la remoción de turbiedad orgánica e inorgánica, color verdadero y aparente, microorganismos patógenos (bacterias, virus, protozoos), algas, plancton, compuestos generadores de sabor y olor, así como precipitados químicos y sustancias orgánicas suspendidas (Arboleda, 1992).

— **Flóculo**

Es una agregación de partículas inorgánicas y/o orgánicas formada durante el proceso de coagulación/floculación, como resultado de la desestabilización de coloides presentes en el agua. Los flóculos poseen suficiente masa y densidad para sedimentar por acción de la gravedad, permitiendo su remoción en las etapas subsiguientes del tratamiento.

— **Sedimentación**

La sedimentación es un proceso físico, mediante el cual los flóculos formados durante la coagulación/floculación se precipitan por acción de la gravedad, debido a su mayor densidad respecto al agua. Este proceso permite la separación de sólidos suspendidos y mejora la calidad del agua en las etapas posteriores del tratamiento.

— **Desnutrición crónica**

La desnutrición crónica es una condición de déficit nutricional prolongado, especialmente crítica en la infancia, que afecta el crecimiento físico y el desarrollo cognitivo. Según el Ministerio de Salud (MINSA), una de sus principales causas es el

consumo de agua no segura, que contribuye a enfermedades diarreicas recurrentes y a una disminución en la absorción de nutrientes esenciales.

— Zona andina

La zona andina comprende el ámbito geográfico de la Cordillera de los Andes, iniciándose aproximadamente a partir de los 500 metros sobre el nivel del mar (msnm) y alcanzando altitudes de entre 4000 y 5000 msnm en su vertiente occidental, y hasta unos 3000 msnm en la vertiente oriental. Esta región se caracteriza por su topografía accidentada, variabilidad climática y una diversidad ecológica y cultural significativa.

— Planta de tratamiento de agua potable (PTAP)

Es un sistema compuesto por un conjunto de infraestructuras, instalaciones, equipos, laboratorios y procedimientos diseñados para transformar el agua cruda en agua apta para el consumo humano. Incluye operaciones unitarias y procesos fisicoquímicos —y en algunos casos bioquímicos— orientados a remover contaminantes físicos, químicos y biológicos, garantizando la calidad sanitaria del agua potable conforme a los estándares normativos.

— Prueba de jarras

La prueba de jarras es un ensayo de laboratorio que simula, en condiciones controladas, los procesos de coagulación, floculación y sedimentación que ocurren en una planta de tratamiento de agua potable (PTAP). Su objetivo principal es determinar el tipo y la dosis óptima de coagulantes y aditivos necesarios para maximizar la remoción de turbiedad, sólidos suspendidos y otros contaminantes del agua cruda.

Este procedimiento utiliza varias jarras agitadas simultáneamente a distintas velocidades (revoluciones por minuto, rpm) y condiciones de operación, permitiendo evaluar parámetros clave como el pH, la temperatura, la concentración del coagulante y el tiempo de sedimentación. Los resultados obtenidos orientan las decisiones operativas en

planta, optimizan el uso de productos químicos y contribuyen al control de calidad del tratamiento.

— Lodos tóxicos con aluminio

Los lodos generados en las plantas de tratamiento de agua potable, particularmente aquellas que utilizan sales de aluminio como coagulantes (como el sulfato de aluminio), son residuos semisólidos compuestos por agua, sólidos orgánicos e inorgánicos. Su composición puede incluir óxidos de aluminio, materia orgánica biodegradable, metales pesados (como plomo, mercurio y cadmio) y nutrientes (como nitrógeno y fósforo). Estos lodos pueden presentar un pH variable (ligeramente ácido o básico), una densidad influida por su contenido de sólidos, y características físicas que van desde color marrón oscuro hasta gris, frecuentemente acompañados de olores desagradables.

Desde una perspectiva ambiental y de salud pública, representan riesgos significativos:

- Contaminación ambiental: La disposición inadecuada puede afectar suelos, aguas superficiales y subterráneas.
- Bioacumulación: Los metales pesados y el aluminio pueden acumularse en la cadena trófica, impactando la salud de organismos acuáticos, animales y humanos.
- Toxicidad del aluminio: La exposición crónica al aluminio, ha sido asociada con alteraciones del sistema nervioso central. Investigaciones como las del neurocientífico Chris Exley han sugerido vínculos entre el aluminio y enfermedades neurodegenerativas como el Alzheimer. Además, la inhalación de partículas de alúmina puede provocar irritación respiratoria, daño renal, enfermedades pulmonares e incluso cáncer.

Dado su potencial peligro, es fundamental que las plantas de tratamiento implementen sistemas eficientes de manejo y disposición final de lodos. Paralelamente, la comunidad científica continúa investigando alternativas más sostenibles y menos tóxicas para reducir el impacto ambiental de estos residuos (Panizza et al., 2008).

— Disposición adecuada de lodos

La gestión de los lodos provenientes del tratamiento de agua con coagulantes basados en aluminio, debe realizarse conforme a las regulaciones ambientales vigentes. Su disposición debe hacerse en sitios autorizados, como vertederos diseñados específicamente para residuos peligrosos. Alternativamente, pueden destinarse a aplicaciones industriales (por ejemplo, materiales de construcción), siempre que se garantice su inocuidad y se cumplan los límites establecidos por la normativa técnica y ambiental.

— Cumplimiento de normas ambientales

El cumplimiento riguroso de las normativas nacionales e internacionales sobre la gestión de residuos peligrosos es esencial para la protección del ambiente y la salud humana. Esto implica desde la caracterización adecuada de los lodos hasta su transporte, tratamiento, reutilización o disposición final bajo criterios de seguridad y sostenibilidad.

— Trazas de aluminio en el cuerpo del agua potable

La presencia de trazas de aluminio en el agua potable, se refiere a concentraciones residuales de este metal, que pueden ingresar al sistema por fuentes naturales (como la erosión de rocas) o por procesos antropogénicos, incluyendo el uso de coagulantes de aluminio en el tratamiento del agua.

Debido a sus posibles efectos adversos en la salud, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido un límite máximo permisible (LMP) de 0.2 mg/L para el aluminio en el agua de consumo humano. Superar este valor puede representar un riesgo, especialmente en poblaciones vulnerables como niños y personas con enfermedades neurológicas o renales.

III. Método

3.1 Tipo de investigación

La presente investigación, se enmarca dentro del enfoque experimental, explicativo, cuantitativo y de corte transversal. Se desarrolló a través de la manipulación controlada de variables independientes - como la concentración y dosis del coagulante, así como la velocidad de agitación - con el objetivo de evaluar su efecto sobre la variable dependiente, que en este caso fue la turbidez del agua. El diseño experimental se estructuró con base en criterios establecidos por el estado del arte en los procesos de coagulación y floculación aplicados al tratamiento de agua.

3.1.1 Población y muestra:

La población estuvo constituida por el conjunto total de pruebas de coagulación y floculación realizadas durante la experimentación. La muestra experimental se organizó en tres tandas, cada una con una réplica, lo cual permitió aplicar métodos de análisis estadístico para la evaluación de los tratamientos implementados y asegurar la validez de los resultados obtenidos.

3.2 Operacionalización de variables

Tabla 5

Operacionalización de las variables

Variables	Definición Conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicador	Instrumento	Escala Valorativa
▪ Turbiedad del agua	La turbiedad, es la pérdida de transparencia del agua, ocasionada por la presencia de partículas suspendidas como coloides, materia orgánica, arcillas y otros sólidos finos. Cuanto mayor es la concentración de estos sólidos, mayor es la turbiedad.	Se medirá la turbiedad inicial y final del agua tratada con coagulante natural, utilizando un nefelómetro. Las muestras serán sometidas a tratamientos con diferentes concentraciones de coagulante, manteniendo condiciones controladas.	Nivel de turbiedad	Unidades nefelométricas de turbidez (NTU)	Nefelómetro	Cuantitativa Continua
▪ Solución de harina de haba (Vicia faba L.) como coagulante y floculante.	Preparado natural de origen vegetal obtenido al disolver harina de haba (Vicia faba L.) en agua destilada, empleado para desestabilizar coloides y favorecer la coagulación y floculación en aguas turbias. Representa una alternativa ecológica a los coagulantes químicos tradicionales	Se prepararán soluciones coagulantes de harina de haba en distintas concentraciones (mg/L), las cuales serán aplicadas al agua con turbiedad constante para evaluar su eficiencia. Se medirá el volumen aplicado y su efecto sobre la reducción de turbiedad.	Concentración del coagulante. Dosis aplicada	Concentración (mg/L) Volumen (mL)	Balanza analítica Pipeta graduada	Cuantitativa continua

Nota: Elaboración propia

3.3 Instrumentos

Los instrumentos y equipos utilizados en la investigación fueron:

Tabla 6

Instrumentos para la investigación

Molino de discos



Molienda de haba
cruda, seca y
descascarada, siendo
la variable más
importante su
velocidad (rpm)

Modelo JERSA MNF 12- 40
Fuerza motriz 4 HP monof/trif
Material Acero inoxidable
Altura máxima 150 cm
Empresa: Molinera Virgen De Chapi, ubicado en
el distrito de San Jerónimo – Cusco, Prolongación
Retamales S/N Llocllapata

Clasificador de harinas



Clasificador de harina
con Ro -Tap

Laboratorio de Tecnología FIP -UNSAAC

Balanza digital



Pesaje de harina de
haba, hasta con 06
cifras significativas

Laboratorio de tecnologías FIP -UNSAAC

Equipo de prueba de jarras



- Para coagulación, floculación y sedimentación de la turbidez.
 - Provisto de agitador, con método estándar ASTM D 2035-08, para test de jarras.
 - Con regulador de velocidad de rotación de 0 a 300 rpm
 - 06 vasos precipitados de 1 L c/u
 - Provisto de foco LED
-

pH metro

Medidor de pH,
digital, portátil

Comprobador de acidez y/o basicidad

Cronometro

Medir y controlar el tiempo de coagulación, floculación, y sedimentación

Turbidímetro

Turbidímetro digital
portátil

Medir la turbiedad del agua cruda. Mide las partículas suspendidas en el agua a través de un haz de luz y un detector de luz. Rendimiento adecuado.

Conductímetro

Medidor de
Conductividad,
portátil

Medidor EC, con compensación automática de temperatura. Rango de 0.0 – 10.0 mS/cm.(equivalente a 0 - 1999 μ S/cm)

Estos equipos, en su mayoría, están disponibles en el laboratorio de aguas, físico química y medio ambiente de la Facultad de Ingeniería de Procesos de la Universidad Nacional de San Antonio Abad de Cusco, y los que no estuvieron disponibles, fueron alquilados o comprados.

4.1. Insumos para la investigación

Los insumos requeridos y sus aplicaciones son:

Tabla 7

Insumos para la investigación

Agua potable	Materia prima para la producción del agua destilada. Fuente: Red pública
Solución coagulante y floculante al 1% p/v	Reactivo preparado con harina de haba cruda (<i>Vicia faba</i> L.) INIA 409 “Munay Angélica” y agua destilada, para coagular y flocular la turbiedad del agua.

Agua turbia superficial	Agua muestreada del río Tenerías (Pumamarca), del distrito de San Sebastián, provincia y región Cusco.
Vasos precipitados (1000 y 500 mL)	Para la prueba de jarras y para la preparación de la solución coagulante y floculante.
Fiola (1000 mL)	Para homogenizar la solución coagulante de harina de haba (<i>Vicia faba</i> L.) por agitación energética.
Baldes y bolsas de plástico	Balde para muestreo de agua cruda superficial del río Tenerías, transporte y almacenamiento. Bolsas para el haba en granos y harina preparada y otros.

4.2. Procedimientos del proceso

3.5.1 Se acopia selectivamente el haba (*Vicia faba* L) INIA 409-“MUNAY ANGELICA”, en el mercado de Vino Canchón de San Jerónimo- Cusco.

3.5.2 Se limpia y acondiciona el haba cruda (una parte se tuesta)

3.5.3 El haba, tanto cruda como tostada, se pela y se muele en una molinera. Posteriormente, la harina obtenida se tamiza utilizando en un cedazo acoplado a un agitador Ro-Tap, empleando una malla de 120 mesh, que permite obtener partículas con un tamaño aproximado de 125 μm (micrómetros).

3.5.4 Se analiza fisicoquímicamente el agua cruda: Turbiedad, pH y conductividad eléctrica, en laboratorio privado.

3.5.5 Se realiza la prueba rápida cualitativa de coagulación/floculación y sedimentación, con harina de haba tostada y cruda.

3.5.6 Preparación de la solución coagulante: Se pesan 10 g de harina y se colocan en un vaso precipitado de 1000 mL. Luego, se añade agua destilada hasta completar el volumen total. La mezcla se agita en el vaso para su disolución inicial y posteriormente se transfiere a una fiola, donde se agita enérgicamente hasta lograr una homogenización completa.

3.5.7 Los seis vasos del equipo de prueba de jarras, se llenan parcialmente con agua turbia proveniente del río Tenerías (Pumamarca), evitando completar su volumen total en esta etapa.

3.5.8 A cada jarra parcialmente llena con agua cruda, se le añade un volumen específico de la solución coagulante/floculante, previamente definido de manera escalonada. Luego, se completa el volumen hasta 1000 mL con la misma agua cruda.

3.5.9 Inmediatamente después, se inicia la etapa de mezcla rápida o coagulación, aplicando la velocidad y el tiempo establecidos. Esta agitación permite una distribución homogénea del coagulante en el cuerpo del agua y provocando la neutralización de cargas de los coloides, favoreciendo la formación inicial de flóculos.

3.5.10 Finalizada la mezcla rápida, se da paso a la mezcla lenta o floculación, también bajo condiciones previamente definidas de velocidad y tiempo. Esta etapa tiene como objetivo facilitar el choque y la aglomeración de los microflóculos, promoviendo la formación de flóculos más grandes (macroflóculos), estas partículas son separadas por sedimentación o filtración.

3.5.11 Concluida la agitación lenta, las jarras se dejan en reposo durante el tiempo planificado, permitiendo que los flóculos sedimenten por acción de la gravedad.

Transcurrido el tiempo de sedimentación, se retiran las jarras del equipo y se procede inmediatamente a la medición de la turbidez final, pH y conductividad eléctrica, anotando esta información a la tabla de resultados previamente preparada. En la tabla de resultados, se anotan la velocidad y tiempo de la agitación rápida y lenta, el volumen y dosis del coagulante (C, mg/L), la turbiedad (τ , NTU) inicial y final, el pH inicial y final, y la conductividad eléctrica inicial y final (μm).

Los ensayos de coagulación/floculación, se realizaron en el laboratorio de tecnologías y fisicoquímica de la Escuela Profesional de Ingeniería Química, de la Facultad de Ingeniería de Procesos de la Universidad Nacional de San Antonio Abad de Cusco.

3.6 Análisis de datos

Se llevó a cabo un análisis estadístico de los datos recopilados y sistematizados en la sección 3.5.11. Estos datos fueron analizados y posteriormente ajustados a modelos matemáticos continuos, considerando el coeficiente de Pearson (R), el coeficiente de determinación (R^2) y el coeficiente de significancia (p).

IV. Resultados

Con el propósito de iniciar los ensayos de coagulación y floculación, se recolectó agua turbia del río Tenerías (también denominado río Pumamarcca), ubicado en el distrito de San Sebastián, provincia y departamento del Cusco. La recolección se realizó utilizando baldes, durante ambos periodos de precipitación del año 2024, con el objetivo de asegurar niveles representativos de turbiedad.

Posteriormente, el agua cruda fue sometida a un análisis físicoquímico en laboratorio, en el cual se evaluaron parámetros tales como turbiedad, pH, conductividad eléctrica y temperatura. Los valores obtenidos se presentan en las tablas correspondientes a cada una de las pruebas de coagulación, floculación y sedimentación.

4.1 Pruebas cualitativas de coagulación rápida.

Se llevaron a cabo pruebas cualitativas preliminares utilizando harina de haba cruda y harina de haba tostada (*Vicia faba* L.) como coagulantes naturales, con el objetivo de evaluar su comportamiento inicial en la clarificación de agua con turbidez. Estas pruebas permitieron identificar, de manera exploratoria, el potencial coagulante de ambos materiales antes de proceder a los ensayos cuantitativos sistemáticos. Los resultados obtenidos se describen a continuación:

4.1.1 Prueba cualitativa rápida con harina de haba (*Vicia faba* L.) tostada

En un vaso precipitado que contenía agua cruda, se añadió una cucharilla de harina de haba tostada. La mezcla fue agitada vigorosamente, utilizando una espátula durante un breve intervalo y luego se dejó reposar durante 30 minutos a temperatura ambiente. Finalizado este periodo de reposo, no se evidenciaron cambios en la turbiedad ni formación observable de flóculos o sedimentos. En consecuencia, se concluyó que la harina de haba tostada no manifiesta una actividad coagulante efectiva bajo las condiciones ensayadas, motivo por el cual fue descartada como agente coagulante en las siguientes etapas experimentales.

4.1.2 Prueba cualitativa rápida con harina de haba (*Vicia faba* L.) cruda

Siguiendo el mismo protocolo experimental, se añadió una cucharilla de harina de haba cruda a un vaso precipitado con agua turbia. La mezcla fue agitada enérgicamente con una espátula y, tras dejarla en reposo, se observó a los pocos minutos la formación evidente de flóculos, acompañada de una sedimentación progresiva y una reducción visible en la turbidez del agua. Estos resultados preliminares demostraron una capacidad coagulante significativa de la harina de haba cruda, lo cual justificó su selección para los ensayos cuantitativos posteriores.

Figura 9

Pruebas rápidas de coagulación



Actividad coagulante
de harina de haba tostada



Actividad coagulante de
la harina de haba cruda

La imagen 9, muestra el resultado de la actividad coagulante de la harina de haba tostada y haba cruda respectivamente. Se observa nítidamente, que la harina de haba cruda tiene acción coagulante y floculante.

En base a este resultado y el estado del arte de estudios sobre coagulación/floculación, principalmente de coagulantes alternativos a los coagulantes sintéticos (sulfato de aluminio en particular), se planificaron las pruebas de jarra en laboratorio, buscando determinar la dosis óptima del coagulante/floculante preparado con harina de haba cruda (*Vicia faba* L.), esperando una degradación significativa de la turbiedad del agua superficial del río Tenerías.

4.1.3 Preparación de la solución coagulante y condiciones experimentales

4.1.3.1 Preparación de la solución madre de coagulante/floculante

Se preparó una solución coagulante con harina de haba cruda (*Vicia faba* L.), con una concentración de 1% p/v (peso/volumen), disolviendo 10 g de harina en 1000 mL de agua destilada. Para su elaboración, la harina fue añadida directamente al agua en un vaso precipitado de 1000 mL, agitada inicialmente con una espátula para facilitar la dispersión del sólido. Luego, la mezcla fue transferida a una fiola volumétrica, donde se agitó vigorosamente hasta lograr una disolución homogénea.

Una vez preparada la solución madre, se definieron los volúmenes a aplicar en cada una de las jarras de prueba, seleccionando valores discretos para facilitar la dosificación, asegurar la reproducibilidad del ensayo y permitir un control preciso de la concentración aplicada.

4.1.3.2 Dosificación por jarra de ensayo

La Tabla 8, muestra la dosificación planificada, expresada en términos de volumen de solución coagulante adicionada por jarra (V_1), volumen de agua turbia (V_2), concentración de la solución madre (C_1) y concentración final en cada jarra (C_2). Los volúmenes fueron establecidos utilizando un balance de masa básico:

$$V_1 = \frac{V_2 \times C_2}{C_1}$$

Tabla 8

Concentración y volumen de la solución coagulante/floculante por jarra

JARRAS	Concentración de la solución madre	Volumen solución coagulante por jarra	Concentración de solución coagulante por jarra	Volumen de agua turbia por jarra
	C_1 (mg/L)	V_1 (mL)	C_2 (mg/L)	V_2 (mL)
Jarra 1	10.000	1	10	1.000
Jarra 2	10.000	2	20	1.000
Jarra 3	10.000	3	30	1.000
Jarra 4	10.000	4	40	1.000
Jarra 5	10.000	5	50	1.000
Jarra 6	10.000	6	60	1.000

Esta estrategia de dosificación, permite evaluar el comportamiento del coagulante en un rango de concentraciones crecientes, facilitando la determinación del intervalo óptimo de aplicación.

4.2 Primera prueba de Coagulación/floculación y sedimentación

La primera prueba de jarras, fue ejecutada utilizando la solución de harina de haba cruda al 1% p/v. El agua cruda utilizada fue recolectada del río Tenerías (también conocido como río Pumamarcca), ubicado en el distrito de San Sebastián, provincia y departamento del Cusco, durante el primer trimestre del año 2024, correspondiente a la primera temporada de lluvias.

El agua fue sometida a un análisis fisicoquímico en laboratorio, para determinar los parámetros críticos para el presente estudio: turbiedad, pH, conductividad eléctrica y temperatura. Los resultados obtenidos se detallan en las tablas correspondientes a cada prueba experimental.

El diseño y ejecución del muestreo siguieron los lineamientos metodológicos establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, 1999, 2013) y la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2004, 2017), con el fin de garantizar la validez y calidad de los resultados. Se seleccionó un único punto de muestreo sobre el cauce del río, aplicando un criterio estacional que representara adecuadamente las condiciones hidrológicas del periodo.

Para el transporte y almacenamiento, se utilizaron baldes de plástico limpios, previamente desinfectados y libres de contaminantes, asegurando así la integridad fisico-química de la muestra hasta su análisis en laboratorio.

Figura 10*Muestreo del agua turbia del río Tenerías*

La Figura 10 muestra el río Tenerías con agua turbia, así como el procedimiento de toma de muestra para el análisis fisicoquímico inicial. La turbiedad observada en el agua, en el contexto del presente estudio, es de origen natural y estacional, resultado de las precipitaciones propias del régimen climático regional, cuyo periodo más intenso se extiende de noviembre a marzo.

▪ Condiciones operativas del ensayo

El procedimiento experimental de esta primera prueba de coagulación/floculación y sedimentación, se estructuró conforme a los siguientes parámetros:

- Concentración inicial del coagulante: 1% p/v (solución madre)
- Mezcla rápida: 150 rpm durante 10 segundos
- Mezcla lenta: 20 rpm durante 20 minutos
- Tiempo de sedimentación: 30 minutos
- Temperatura: condiciones ambientales constantes (sin control específico requerido)

Estas condiciones se definieron considerando la experiencia reportada en estudios previos y se mantuvieron constantes a lo largo de los ensayos para asegurar la comparabilidad de los resultados.

4.2.1 Carga y aforo de las jarras

Para el desarrollo del ensayo de coagulación/floculación, se procedió a la carga de agua cruda en las seis jarras del equipo de prueba (vasos de precipitación de 1000 mL), llenándolas

inicialmente hasta un volumen cercano al total. A continuación, se adicionaron de forma secuencial 10, 20, 30, 40, 50 y 60 mL de la solución coagulante/floculante al 1% p/v (solución madre). Una vez incorporada la solución coagulante en cada jarra, se completó el volumen total hasta 1000 mL mediante el aforo con agua cruda del mismo lote, asegurando así, la homogeneidad en las condiciones iniciales de prueba. Este procedimiento garantizó una dosificación precisa y reproducible del coagulante, conforme al diseño experimental.

Figura 11

Jarras con agua turbia (agua cruda)



La Figura 11 muestra las 06 jarras con agua turbia, listas para ser colocadas en el equipo de prueba de jarras, previa adición de la solución coagulante.

4.2.2 Coagulación

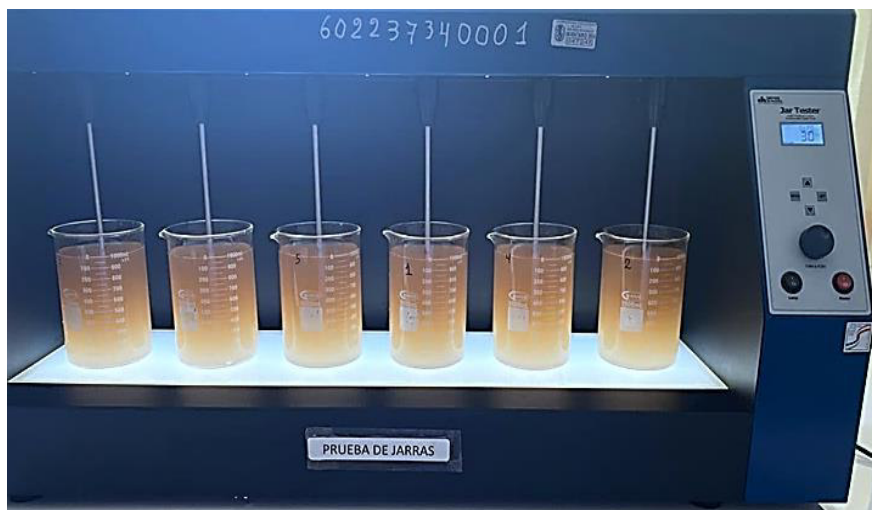
Una vez completado el aforo de las jarras con agua cruda y solución coagulante, se procedió con la fase de coagulación, con agitación rápida a 150 rpm, durante 10 segundos. Este proceso tuvo como finalidad favorecer la dispersión inmediata y homogénea del coagulante natural en el cuerpo total del agua, promoviendo colisiones inter partículas de alta energía, necesarias para desestabilizar los coloides presentes en suspensión.

Durante esta etapa, las fuerzas de cizallamiento generadas por la agitación rápida, facilitaron el contacto entre las partículas de turbiedad y los componentes activos de la harina

de haba cruda (principalmente proteínas), iniciando así los mecanismos de neutralización de cargas eléctricas superficiales y la posterior formación de núcleos primarios de agregación.

Figura 12

Mezcla rápida (coagulación)



La figura 12, muestra el equipo de “prueba de jarras” en pleno trabajo de coagulación.

4.2.3 Floculación

Una vez completada la etapa de coagulación, se dio inicio a la fase de floculación, aplicando una agitación lenta y controlada a 20 rpm durante 20 minutos. Esta fase tuvo como propósito promover el crecimiento, estabilización y maduración de los microflóculos generados durante la mezcla rápida, mediante la facilitación de interacciones inter partículas.

La disminución de la velocidad de agitación, redujo las fuerzas de corte, minimizando la ruptura de los agregados ya formados y favoreciendo mecanismos como el puenteo físico y la atracción entre flóculos. Estas condiciones permitieron la formación de flóculos de mayor tamaño, masa y resistencia mecánica, lo que mejora significativamente su capacidad de sedimentación

El control riguroso de la velocidad de mezcla y del tiempo de floculación fue crítico para garantizar la eficiencia del tratamiento, ya que flóculos adecuadamente desarrollados aseguran una clarificación más efectiva en la etapa siguiente.

Figura 13*Mezcla lenta (floculación)*

La figura 13, muestra la floculación, donde ya se puede apreciar la clarificación del agua frente a la jarra testigo.

4.2.4 Sedimentación

Concluida la fase de agitación lenta, se permitió la sedimentación por gravedad de los flóculos formados, manteniendo las jarras en reposo durante 30 minutos. Durante este intervalo, se observó de manera clara la formación y sedimentación progresiva de flóculos y macroflóculos, cuya masa y densidad favorecieron su asentamiento en el fondo de cada jarra.

Al finalizar el tiempo establecido para la sedimentación, se evidenció una clarificación notable del agua sobrenadante en todas las unidades experimentales, lo cual constituye un indicador cualitativo de la eficiencia del proceso de coagulación/floculación.

Posteriormente, se procedió a la evaluación de los parámetros fisicoquímicos de control en el agua clara sobrenadante, específicamente: turbiedad, pH y conductividad eléctrica, empleando los mismos instrumentos, métodos y condiciones que fueron utilizados en las mediciones iniciales para garantizar la reproducibilidad de los datos.

Las mediciones obtenidas fueron registrados en la tabla de resultados preestablecida, la cual contenía los valores de referencia correspondientes al agua cruda. Este protocolo

experimental fue adoptado como procedimiento estándar y se aplicará de manera sistemática en todos los ensayos de jarras desarrollados durante esta investigación.

Figura 14

Jarras después de 30 minutos de sedimentación.



En la figura 14, se observan las jarras con turbiedad sedimentada, mostrando agua clarificada. Es evidente la diferencia entre el agua de la jarra coagulada, floculada y sedimentada y el agua cruda de la jarra testigo.

Los flóculos sedimentados, en una hipotética planta de tratamiento de agua potable (PTAP), representarían el lodo precipitado, un lodo orgánico que está listo para ser removido y dispuesto de manera segura.

4.2.5 Resultados de la primera prueba de jarras

Tabla 9

Resultados de la coagulación/floculación y sedimentación de la primera prueba de jarras

Variables / Jarras	1	2	3	4	5	6
Turbiedad inicial, τ (NTU)	436	436	436	436	436	436
pH inicial	8,23	8,23	8,23	8,23	8,23	8,23
Conductividad inicial ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	4800	4800	4800	4800	4800	4800
Dosis coagulante (C, mg/L)	10	20	30	40	50	60
Volumen coagulante (mL)	1	2	3	4	5	6
Mezcla rápida (rpm)	150	150	150	150	150	150
Tiempo mezcla rápida (s)	10	10	10	10	10	10
Mezcla lenta (rpm)	20	20	20	20	20	20
Tiempo mezcla lenta (min)	20	20	20	20	20	20
Tiempo sedimentación (min)	30	30	30	30	30	30
Turbiedad final (τ , NTU)	13,65	11,58	8,79	8,86	7,45	6,96
pH (final)	8,21	8,32	8,36	8,39	8,40	8,40
Conductividad eléctrica final ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	4800	4780	4797	4802	4800	4798

La tabla 9, muestra los parámetros de turbiedad, pH y conductividad eléctrica inicial y final del agua tratada; velocidad y tiempo de mezcla rápida (coagulación) y mezcla lenta (floculación); las dosis y volumen del coagulante y el tiempo de sedimentación.

Es notoria, la degradación de la turbiedad, dado que partiendo de 436 NTU desciende a 6,96 NTU en la jarra 6, como respuesta a la aplicación de 60 mg/L del coagulante natural.

Es conveniente señalar, que la prueba corresponde al mes de marzo de 2024, periodo de intensas precipitaciones, que explica la turbiedad del agua.

4.2.6 Análisis estadístico de los datos obtenidos en la primera prueba de jarras

Tabla 10

Degradación de la turbiedad

Jarra Nro.	Dosis coagulante, C(mg/L)	Turbiedad inicial, τ (NTU)	Turbiedad final, τ (NTU)	Degradación de la turbidez (%)
1	10	436	13,65	96,87
2	20	436	11,58	97,34
3	30	436	8,79	97,98
4	40	436	8,86	97,97
5	50	436	7,45	98,29
6	60	436	6,96	98,40

La Tabla 10, presenta los resultados sobre la reducción de la turbiedad, evidenciando una alta eficacia coagulante y floculante de la solución de harina de haba cruda (*Vicia faba* L.). Se observó una reducción de la turbiedad superior al 96% en la jarra 1, para una dosis de coagulante de 10 mg/L y una máxima reducción de turbiedad del 98,40% para una dosis de coagulante de 60 mg/L en la jarra 6.

Los resultados obtenidos, evidencian la eficacia del coagulante natural empleado como reactivo primario en la clarificación de aguas turbias, demostrando su potencial como alternativa sostenible frente al uso de coagulantes químicos sintéticos. Se observa una relación directa entre la concentración del coagulante (C, mg/L) y la reducción de la turbiedad (τ , NTU), de modo que un incremento en la dosis se asocia con una mayor eficiencia en la remoción de

partículas suspendidas. No obstante, el comportamiento de la curva de remoción sugiere que aún no se ha alcanzado la dosis óptima, definida como el punto a partir del cual aumentos adicionales en la concentración no producen mejoras estadísticamente significativas en la reducción de turbiedad.

Con el objetivo de caracterizar funcionalmente dicha relación, se procedió a la representación gráfica de los datos experimentales, considerando la concentración del coagulante como variable independiente (C , mg/L) y la turbiedad final como variable dependiente (τ , NTU). Este análisis gráfico preliminar permitirá identificar la posible naturaleza funcional de la relación - ya sea lineal, cuadrática u otro tipo de comportamiento no lineal- y seleccionar el modelo matemático más apropiado para describir el fenómeno observado.

Posteriormente, se realizará un ajuste de curva mediante técnicas de regresión estadística, con el fin de cuantificar la calidad del modelo propuesto. Para ello, se calcularán el coeficiente de correlación de Pearson (R) y el coeficiente de determinación (R^2), indicadores estadísticos que permitirán evaluar la fuerza, dirección y precisión del ajuste. Estos parámetros serán fundamentales para validar la idoneidad del modelo en la representación del comportamiento experimental observado.

Tabla 11

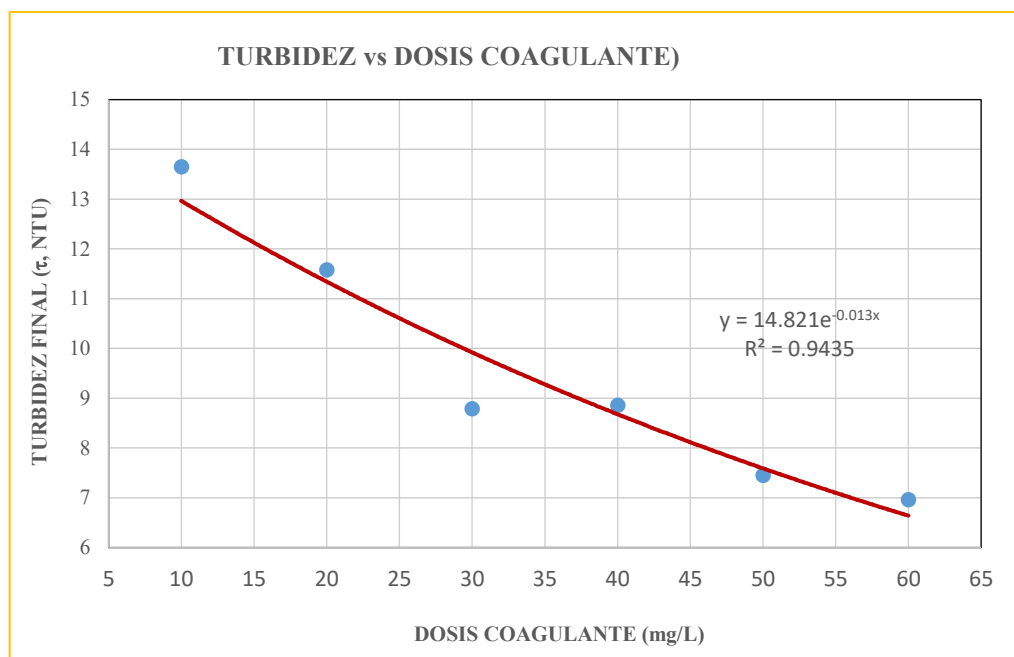
Efecto de la dosis de coagulante en la turbiedad

Dosis coagulante, C (mg/L)	Turbiedad final, τ (NTU)
10	13,65
20	11,58
30	8,79
40	8,86
50	7,45
60	6,96

La Tabla 11 muestra la turbidez final de cada jarra, una vez finalizados los procesos de coagulación, floculación y sedimentación, en función de la dosis de coagulante aplicada. Estos datos permitieron graficar y seleccionar el modelo matemático que mejor podría expresar la correlación entre la variable independiente (C, mg/L) y la variable dependiente (τ , NTU).

Figura 15

Efecto de la dosis de coagulante en la turbiedad del agua



La Figura 15, revela que la curva que mejor se ajusta al fenómeno, según los datos obtenidos, es un modelo exponencial. Esto indica, que existe una correlación exponencial entre la variable independiente y la variable dependiente, lo que permite la aplicación de un modelo de regresión exponencial decreciente.

Con esta información y con el objetivo de ajustarlo a un modelo continuo, se recurre al análisis de regresión mediante el método de los Mínimos Cuadrados. Esta técnica de análisis estadístico, enmarcada dentro de la optimización, busca encontrar una función continua que se aproxime de la mejor manera a los datos, utilizando como criterio la minimización del error en un conjunto de pares ordenados de la variable independiente y la variable dependiente.

4.2.7 Análisis y modelamiento de la data de la primera prueba de jarras

Se procede a un ajuste con un modelo exponencial, del tipo logístico o crecimiento logístico, puesto que esta herramienta es útil en la modelización de procesos biológicos y ambientales (Fundación Aquae, s.f.; Wikipedia, 2024; StudySmarter, s.f.) en este caso, a la degradación de la turbiedad del agua, este ajuste, ayuda a minimizar el error entre la función y los datos empíricos, buscando una mejora sustantiva en la representación del proceso de coagulación/floculación.

Las formas de dependencia de la Turbiedad final, $\hat{\tau}$ (NTU), de la dosis del coagulante, C (mg/L), según su comportamiento descendente tiene la forma:

$$\hat{\tau} = A \times e^{-k \times C} + \delta$$

La ecuación, describe el cómo se reduce la turbiedad del agua en función de la concentración del coagulante, con un nivel mínimo de turbiedad (δ) remanente, que no se puede eliminar. Los parámetros o variables involucrados en la ecuación significan o representan:

$\hat{\tau}$ (NTU): Turbiedad final estimada del agua, en un momento dado. Es la variable dependiente que se modela en función de la concentración del coagulante (C , mg/L).

A: (Amplitud o Valor Asintótico): Corresponde al valor que toma la turbidez (τ) cuando la concentración de coagulante (C) tiende a 0. Es la diferencia entre la turbidez inicial y la meseta mínima (δ), es decir, la fracción de turbidez que puede ser removida por acción del coagulante o la turbidez potencialmente reducible al inicio del proceso de tratamiento

e: Base del logaritmo natural. Empleada en funciones exponenciales como en este caso, para describir la disminución de la turbiedad.

k: (Tasa de degradación): Constante de tasa de reducción de la turbiedad (eficiencia cinética). Cuantifica la rapidez con que disminuye la turbiedad en respuesta al aumento de la concentración del coagulante. Un mayor valor de k , significa una más rápida reducción de la turbiedad (efectividad del proceso)

C (mg/L): Concentración del coagulante natural aplicado al agua turbia. Es la variable independiente.

δ (Valor de la turbiedad residual, NTU): Turbiedad residual mínima alcanzable tras el tratamiento. Representa el límite inferior de remoción, no superable incluso con mayores dosis de coagulante. La parte de turbiedad que siempre quedará al final.

La dependencia de la Turbiedad final, (τ , NTU) de la dosis del coagulante, (C, mg/L), según su comportamiento descendente tiene dos formas:

- **Modelo descendente simple**

$\hat{\tau} = A \times e^{-k \times C}$ No es conveniente, por no considerar el valor residual asintótico.

A efectos de estimar los valores de las constantes A y k, se procede a la linealización logarítmica del modelo:

$$\ln \hat{\tau} = \ln A - k \times C$$

Utilizando, el método de los mínimos cuadrados (MMC), se estiman los valores de las constantes A y k, quedando definida la función logística descendente simple:

$$\hat{\tau} = 14.9954 \times e^{-0.01367 \times C}$$

Esta ecuación, tiene un coeficiente de correlación de Pearson $R = -0.9844$ lo que significa una fuerte y negativa relación lineal entre las dos variables, y el coeficiente de determinación $R^2 \times 100 = 96.90\%$, medida estadística utilizada para evaluar el ajuste del modelo. Esta variable indica la proporción de la variabilidad de la variable dependiente explicada por la variable independiente en el modelo. En otras palabras, (R^2), mide qué tan bien se ajusta el modelo a los datos observados.

- **Modelo descendente corregido y mejorado**

$$\hat{\tau} = A \times e^{-k \times C} + \delta$$

Linealizando logarítmicamente la función de transferencia:

$$\ln(\hat{\tau} - \delta) = \ln A - k \times C$$

Los parámetros A y k, se calculan en la misma forma que para el modelo simple, para ese fin, se debe determinar primero el valor del factor asintótico de turbiedad (δ), procediendo como sigue:

Se toman tres valores de la variable independiente (C) de la tabla 11 y los valores correspondientes de la variable dependiente (τ), de preferencia, se toma el primer valor (C_1) y el último (C_2) y el valor intermedio (C_3). El valor intermedio C_3 , es la media aritmética entre el primero y el último de los valores independientes. Como para el valor intermedio de la variable independiente, no hay el valor correspondiente de la variable dependiente en la tabla de resultados, este se calcula interpolando. Con el τ_3 calculado, se utiliza la siguiente ecuación para calcular δ :

$$\delta = \frac{\tau_1 \times \tau_2 - \tau_3^2}{\tau_1 + \tau_2 - 2\tau_3}$$

La data disponible y la calculada es la siguiente:

Primer valor de: $C_1 = 10$, le corresponde: $\tau_1 = 13.65$

Último valor de: $C_2 = 60$, le corresponde: $\tau_2 = 6.96$

Valor intermedio de C_3 : $\frac{10+60}{2} = 35$ mg/L,

Como para este valor no hay el valor de la variable dependiente en la tabla de resultados; se interpola, determinando un valor de

$$\tau_3 = 8.795$$

Ahora, reemplazamos en la fórmula:

$$\delta = \frac{13.65 \times 6.96 - 8.795^2}{13.65 + 6.96 - 2(8.795)} = 5.845$$

- Este valor, se incorpora al modelo objetivo o función de tranfrecia:

$$\hat{\tau} = A \times e^{-k \times C} + 5.845$$

- Para calacular los valores de los parametros A y k, se linializa la ecuacion y se aplica la regresión lineal simple:

$$\ln(\hat{\tau} - 5.845) = \ln A - k * C$$

- El modelo logístico resultante es la siguiente:

$$\hat{\tau} = 11.9351 \times e^{-0.0395 \times C} + 5.845$$

El coeficiente de correlación de Pearson para este modelo es $R = -0.9978$ que significa, una fuerte y negativa relación lineal entre las dos variables, casi perfecto, que dice que cuando la variable independiente crece, la variable dependiente decrece, y el coeficiente de determinación $R^2 * 100 = 99.56 \%$, proporción en la que explica la variable independiente la variabilidad de la variable dependiente, estos resultados, indican la validez del modelo matemático seleccionado.

Con la ecuación del modelo logístico, se recalcula la turbiedad final ajustada, cuyo resultado se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 12

Turbiedad final y turbiedad final estimada con el modelo de simulación logística

Dosis coagulante, C (mg/L)	Turbiedad final, τ (NTU)	Turbiedad final estimado modelo logístico, $\hat{\tau}$ (NTU)
10	13,65	13,886
20	11,58	11,262
30	8,79	9,495
40	8,86	8,304
50	7,45	7,502
60	6,96	6,961

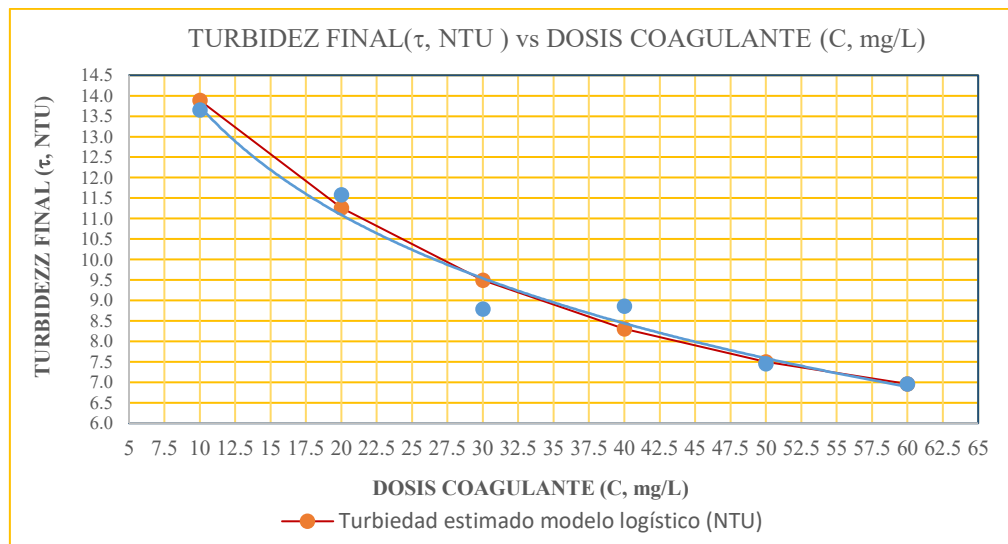
En la Tabla 12, se presentan los valores de turbiedad final obtenidos experimentalmente, junto con los valores estimados mediante el modelo de simulación logística. Se observa una alta concordancia entre los valores observados (τ) y los valores estimados ($\hat{\tau}$), lo que indica que el modelo logístico ajusta adecuadamente el comportamiento del sistema. Esta correspondencia sugiere que la relación entre la dosis del coagulante natural (C, mg/L) y la turbiedad final (τ , NTU) sigue una tendencia decreciente de tipo sigmoidea, característica de modelos logísticos no lineales.

En términos funcionales, el modelo logístico representa un proceso de remoción de turbiedad que experimenta una disminución acelerada al inicio, conforme se incrementa la concentración del coagulante, seguida de una fase de desaceleración, en la cual los incrementos adicionales en la dosis generan reducciones marginales cada vez menores. Este comportamiento evidencia la existencia de un valor asintótico, es decir, un límite inferior de turbiedad al que el sistema tiende, pero que no puede ser superado significativamente con mayores dosis del coagulante.

La capacidad del modelo para captar esta dinámica sugiere que la dosis óptima se encuentra próxima a aquella en la cual la pendiente de la curva comienza a estabilizarse, lo cual resulta clave para una **gestión eficiente del coagulante**, evitando sobredosificaciones innecesarias sin mejoras sustanciales en el tratamiento del agua.

Figura 16

Turbiedad final (τ) medido y turbiedad final estimada ($\hat{\tau}$) y dosis de coagulante



En la figura 16, la curva azul representa la tendencia de las mediciones de la turbiedad en laboratorio, mientras que la curva marrón representa la tendencia de los valores de la turbiedad estimada con el modelo exponencial. Gráficamente, la proximidad de los puntos que representan los resultados de laboratorio y los estimados es evidente, lo que valida el modelamiento adoptado.

En este caso, el análisis estadístico arroja un coeficiente de correlación de Pearson $R = -0,9989$, lo que indica una relación negativa extremadamente fuerte entre la dosis del coagulante (variable independiente) y la turbiedad final estimada (variable dependiente). Este resultado refleja que, a medida que se incrementa la concentración del coagulante, la turbiedad disminuye sistemáticamente. Asimismo, el coeficiente de determinación $R^2 = 0,9979$ (99,79%) revela que el modelo logístico explica prácticamente la totalidad de la variabilidad observada en la turbiedad final, lo que denota un ajuste sobresaliente.

Por otro lado, el valor de significancia estadística (Sig. = 0,001) indica que la relación entre las variables no es producto del azar, sino altamente significativa desde el punto de vista estadístico, con un nivel de confianza superior al 99,9%. Esto valida la solidez del modelo empleado para describir el comportamiento del sistema.

En términos operativos, los resultados permiten concluir que a mayor dosis de coagulante (C, mg/L), mayor es la reducción de turbiedad (τ , NTU), aunque sin haberse alcanzado aún el punto de saturación del proceso, es decir, el nivel máximo de eficiencia en los mecanismos de coagulación y floculación. No obstante, el comportamiento de la curva sugiere que una dosis de 60 mg/L se aproxima al valor óptimo, más allá del cual los beneficios adicionales en la remoción de turbiedad serían marginales en relación con el aumento del coagulante.

4.2.8 Efecto de la degradación de la turbiedad en el pH del agua

Tabla 13

Variación del pH con la degradación de la turbiedad del agua

Jarra Nro.	Dosis coagulante, C (mg/L)	Turbiedad Final, τ (NTU)	pH (inicial)	pH (final)
1	10	13,886	8,23	8,21
2	20	11,262	8,23	8,32
3	30	9,495	8,23	8,36
4	40	8,304	8,23	8,39
5	50	7,502	8,23	8,40
6	60	6,961	8,23	8,40

En la Tabla 13 se presenta la evolución del pH en función de la dosis del coagulante natural (harina de haba) y su efecto sobre la remoción de turbiedad. Los resultados muestran que, para todas las concentraciones evaluadas (10 - 60 mg/L), el pH final del agua tratada se mantuvo dentro del rango recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para agua destinada al consumo humano, es decir, entre 6,5 y 8,5. La variación máxima registrada fue de solo 0,17 unidades de pH (de 8,23 a 8,40), correspondiente a la jarra N.º 6 (60 mg/L), lo cual es considerado insignificante desde el punto de vista sanitario y ambiental.

De acuerdo con las directrices tanto de la OMS como de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), fluctuaciones menores a 0,2 unidades de pH no generan riesgos significativos para la calidad del agua ni para su potabilidad. Esto evidencia que el uso del coagulante natural no induce alteraciones químicas agresivas en el medio, preservando así la estabilidad del parámetro pH.

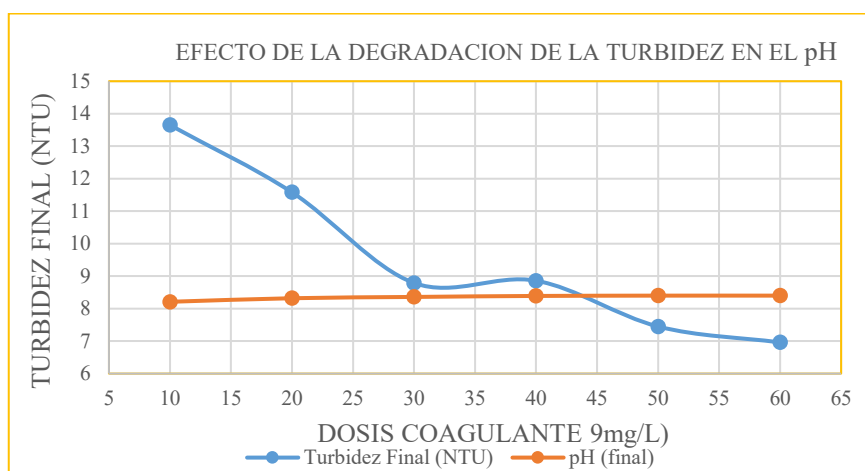
El ligero incremento en el pH observado con el aumento de la dosis del coagulante podría explicarse por dos mecanismos complementarios:

1. Neutralización de cargas superficiales: Durante el proceso de coagulación, los iones presentes en la harina de haba interactúan con las partículas coloidales cargadas negativamente, promoviendo la neutralización de cargas y generando un ligero reordenamiento iónico en la solución, lo cual puede manifestarse como un pequeño aumento del pH.
 2. Liberación de compuestos de carácter básico: Es probable que, durante la disolución de la harina de haba en el medio acuoso, se liberen compuestos ligeramente alcalinos, como ciertas aminas, proteínas solubles o sales minerales (por ejemplo, fosfatos o carbonatos), que contribuyen al incremento del pH observado, especialmente en las dosis más altas.
- En conjunto, los resultados indican que el empleo de harina de haba como coagulante natural no compromete la estabilidad química del agua tratada, manteniendo niveles de

pH seguros tanto para el consumo humano como para su eventual descarga en cuerpos receptores, conforme a las normativas ambientales vigentes. Además, esta estabilidad del pH sugiere que el coagulante no requiere corrección posterior del equilibrio ácido-base del agua, lo cual representa una ventaja operativa y económica significativa frente a algunos coagulantes sintéticos que sí alteran sustancialmente el pH del sistema.

Figura 17

Efecto de la degradación de la turbiedad en el pH



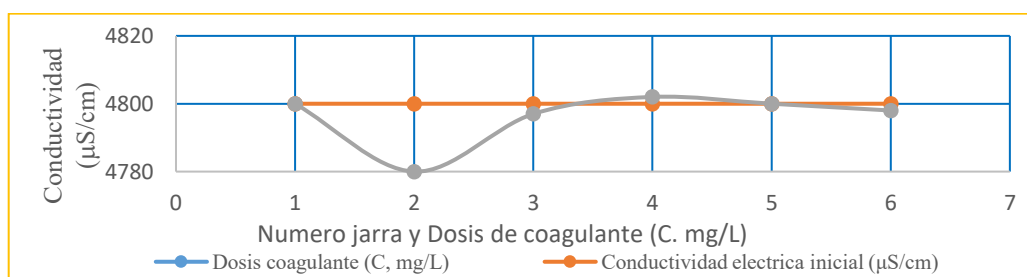
En la Figura 17, se observa que hay una ligera variación del pH, dado que un pH inicial de 8,23, decrece a 8,21 en la primera jarra, para terminar en 8,40 en la jarra 6, lo que podría significar que a mayor degradación de la turbidez mayor pH.

4.2.9 Efecto de la degradación de la turbiedad en la conductividad eléctrica del agua

La conductividad eléctrica inicial fue constante en todas las muestras (4800 $\mu\text{S}/\text{cm}$), lo que garantiza condiciones homogéneas de partida para la evaluación del efecto del coagulante.

Figura 18

Efecto de la degradación de la turbiedad en la conductividad eléctrica



La Figura 18, presenta la evolución de la conductividad eléctrica del agua antes y después del tratamiento con diferentes dosis de harina de haba utilizada como coagulante natural. La conductividad eléctrica inicial fue constante en todas las muestras ($4800 \mu\text{S}/\text{cm}$), lo que asegura condiciones homogéneas de partida para la evaluación comparativa del tratamiento. Luego del proceso de coagulación, se observa que la conductividad eléctrica final presenta variaciones mínimas, con fluctuaciones que oscilan entre $-20 \mu\text{S}/\text{cm}$ y $+2 \mu\text{S}/\text{cm}$ respecto al valor inicial. Estas diferencias representan un cambio relativo menor al 0,5 %, y en promedio aritmético una disminución del 0,08 %, valor que puede considerarse estadísticamente insignificante en términos de impacto iónico sobre la solución.

Estos resultados permiten establecer las siguientes conclusiones clave:

- Estabilidad del parámetro de conductividad eléctrica: El coagulante natural, no genera alteraciones significativas en la concentración de iones disueltos, lo que indica que no introduce ni remueve sales en niveles que afecten la conductividad del agua. Esto sugiere que el equilibrio iónico del sistema, se mantiene inalterado durante el proceso de tratamiento.
- Comparación con coagulantes químicos convencionales: A diferencia de coagulantes sintéticos como el sulfato de aluminio, que pueden incrementar la carga iónica del medio (por ejemplo, mediante la liberación de sulfatos) y requerir neutralización posterior del pH con compuestos alcalinos, el coagulante natural no implica la incorporación de especies químicas agresivas, lo que constituye una ventaja significativa en contextos donde se requiere un tratamiento más sostenible y menos invasivo.
- Relevancia ambiental y operativa: La baja interferencia iónica asociada al uso de harina de haba, la convierte en una alternativa adecuada para aplicaciones donde la estabilidad de la conductividad es crítica, como en procesos industriales sensibles,

sistemas de reutilización de agua o en descargas reguladas hacia cuerpos receptores, donde los parámetros físico-químicos deben mantenerse dentro de rangos normativos estrictos.

4.3. Segunda prueba de Coagulación/floculación y sedimentación

Esta prueba, se realiza en base al estándar establecido para la primera prueba, pero se procesa agua cruda con mayor turbiedad inicial, esta mayor turbiedad responde a una mayor intensidad de las lluvias, cuyos resultados son:

Tabla 14

Resultados de la coagulación/ floculación y sedimentación de la segunda prueba de jarras.

Variables \ Jarras	1	2	3	4	5	6
Turbidez inicial (τ , NTU)	455	455	455	455	455	455
pH (inicial)	8,21	8,21	8,21	8,21	8,21	8,21
Conductividad inicial ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	4800	4800	4800	4800	4800	4800
Dosis coagulante (C, mg/L)	10	20	30	40	50	60
Volumen coagulante (mL)	1	2	3	4	5	6
Velocidad mezcla rápida (rpm)	150	150	150	150	150	150
Tiempo mezcla rápida (s)	10	10	10	10	10	10
Velocidad mezcla lenta (rpm)	20	20	20	20	20	0
Tiempo mezcla lenta (min)	20	20	20	20	20	20
Tiempo de Sedimentación (min)	30	30	30	30	30	30
Turbidez final (τ , NTU)	15,41	14,35	14,18	11,56	10,90	9,73
pH (final)	8,20	8,24	8,25	8,28	8,23	8,25
Conductividad final ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	4800	4740	4786	4754	4740	4770

Estos resultados, se obtuvieron, manteniendo constantes las condiciones operativas clave: mezcla rápida y lenta, tiempo de sedimentación, volumen de agua y la dosis de coagulante natural en un rango de 10 a 60 mg/L.

Es evidente la disminución de la turbiedad provocada por la coagulación/floculación y sedimentación, que reitera la potencia coagulante de las proteínas de la harina de haba.

4.3.1 Análisis estadístico de los datos obtenidos en la segunda prueba de jarra

Tabla 15

Degradación de la turbiedad

Jarra Nro.	Dosis coagulante, (C, mg/L)	Turbidez inicial, (τ , NTU)	Turbidez final (τ , NTU)	Degradación (%)
1	10	455	15,41	96,61
2	20	455	14,35	96,85
3	30	455	14,18	96,88
4	40	455	11,56	97,46
5	50	455	10,90	97,60
6	60	455	9,73	97,86

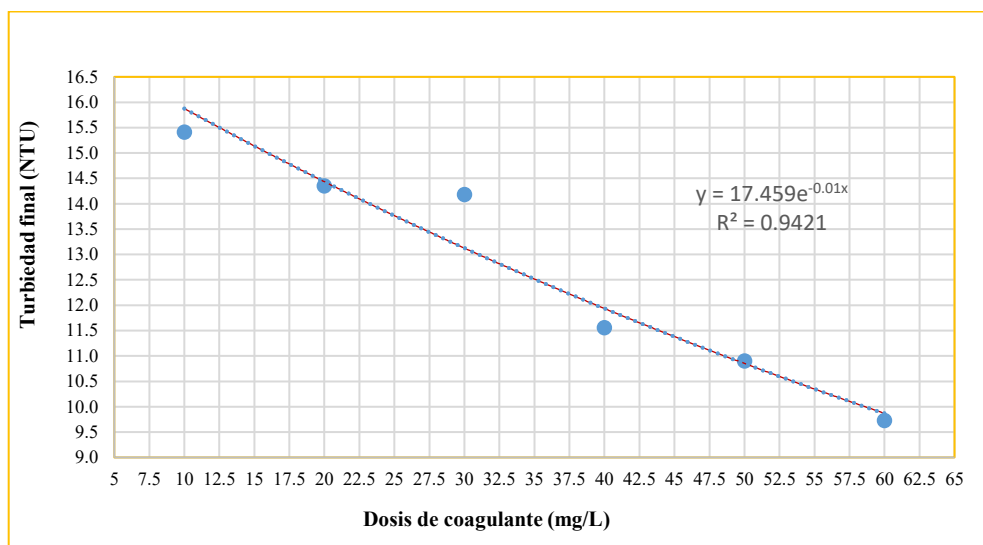
La tabla 15, muestra la efectividad de la harina de haba como coagulante/floculante primario, alcanzando una degradación de la turbiedad por encima del 96% para todas las jarras y un 97,86 % para la jarra 6 como máximo, que trabajó con una dosis de 60 mg/L o 60 ppm de solución coagulante, que se considera próximo a la dosis óptima de coagulante.

Tabla 16

Efecto de la dosis de coagulante en la degradación de la turbiedad

Jarra Nro.	Dosis coagulante (C, mg/L)	Turbiedad final, (τ , NTU)
1	10	15,41
2	20	14,35
3	30	14,18
4	40	11,56
5	50	10,9
6	60	9,73

La Tabla 16, evidencia una relación directa entre la dosis del coagulante natural y la reducción de la turbiedad final del agua tratada. A medida que se incrementa la concentración del coagulante (C, mg/L), se observa una disminución progresiva de los valores de turbiedad (τ , NTU), lo cual indica un efecto positivo en la eficiencia del proceso de clarificación. Este comportamiento, sugiere que el coagulante actúa eficazmente en la desestabilización y reducción de partículas en suspensión. Para evaluar con mayor claridad esta tendencia y su posible ajuste a un modelo matemático, se grafica la data experimental.

Figura 19*Efecto de la dosis de coagulante en la turbiedad del agua*

La Figura 19, muestra una relación exponencial entre la variable independiente y la variable dependiente, confirmando que a mayor dosis de coagulante mayor degradación de la turbiedad, en base a esta información, se procede al análisis de la data producida.

4.3.2 Análisis y modelamiento de la data de la segunda prueba experimental

Con la información producida y con el propósito de optimizar los resultados, nuevamente se procede a un ajuste con un modelo exponencial, utilizando el modelo o crecimiento logísticos, este ajuste, ayuda a minimizar el error entre la función y los datos empíricos, buscando una mejora sustantiva en la representación del proceso de coagulación/floculación. Se utiliza para este fin, la ecuación de ajuste logístico mejorado.

- **Modelo descendente corregido y mejorado**

$$\hat{\tau} = Ae^{-k \cdot C} + \delta$$

Se procede de la misma forma que para el primer caso:

- Se linealiza la ecuación exponencial

$$\ln(\hat{\tau} - \delta) = \ln A - k \cdot C$$

- Para calcular el valor del coeficiente asintótico (δ), se procede a calcular la media aritmética de la dosis del coagulante (C) y por interpolación se estima el valor medio de la turbidez (τ)

$$\delta = \frac{\tau_1 \times \tau_2 - \tau_3^2}{\tau_1 + \tau_2 - 2\tau_3}$$

$$\delta = \frac{15,41 * 9,73 - 12,34^2}{15,41 + 9,73 - 2 * 12,34} = -5,08$$

- Teniendo el valor de delta, la ecuación exponencial queda así

$$\hat{\tau} = Ae^{-k.C} - 5,08 ,$$

y linealizando logarítmicamente la ecuación y aplicando el método de los mínimos cuadrados (MMC), se calculan los valores de las constantes A y k, quedando definida el modelo logístico.

$$\hat{\tau} = 22,01e^{-0,006574*C} - 5,08$$

Con este modelo se procede a la estimación de la turbiedad final, cuyo resultado es:

Tabla 17

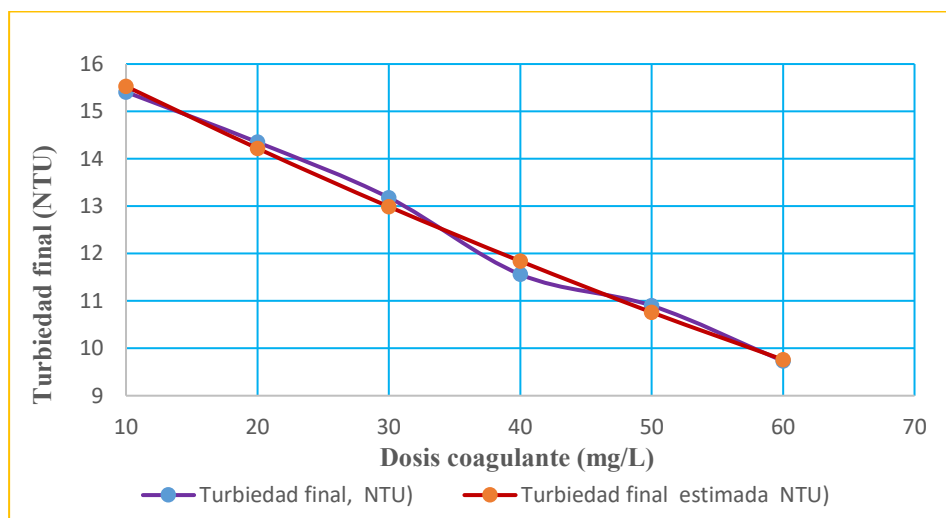
Turbiedad final, turbiedad final estimada y dosis de coagulante

Jarra Nro.	Dosis coagulante, C (mg/L)	Turbiedad final, τ (NTU)	Turbiedad final estimada $\hat{\tau}$ (NTU)
1	10	15,41	15,53
2	20	14,35	14,22
3	30	13,18	12,99
4	40	11,56	11,84
5	50	10,9	10,76
6	60	9,73	9,76

La tabla 17, muestra que los resultados experimentales de la degradación de la turbiedad y los estimados con la ecuación de simulación son muy próximos, confirmando la validez del modelo adoptado.

Figura 20

Turbiedad final, turbiedad final estimada y dosis de coagulante



La Figura 20, presenta la relación entre la dosis del coagulante natural y la turbiedad final del agua, mostrando tanto los valores experimentales como los estimados mediante un modelo logístico decreciente. Se observa una clara tendencia de reducción progresiva de la turbiedad a medida que aumenta la concentración del coagulante, lo que confirma la eficacia del tratamiento.

Es especialmente relevante la proximidad entre los valores observados y los estimados por el modelo, lo que evidencia un alto grado de ajuste y valida la idoneidad del modelo logístico adoptado para describir este comportamiento no lineal.

Desde el punto de vista estadístico, el coeficiente de correlación de Pearson ($R = -0,9998$) indica una correlación negativa casi perfecta entre la dosis del coagulante y la turbiedad residual del agua, lo que implica que, al incrementar la concentración del coagulante, la turbiedad disminuye de manera sistemática y predecible.

Asimismo, el coeficiente de determinación ($R^2 = 0,9996$ o 99,96 %) demuestra que el modelo explica prácticamente la totalidad de la variabilidad de la turbiedad final en función de la dosis aplicada, con un nivel de significancia estadística ($\text{Sig.} < 0,01$) que confirma la robustez del modelo y la no aleatoriedad de la relación observada.

En conjunto, estos resultados permiten concluir que el modelo logístico decreciente es altamente adecuado para predecir la respuesta del sistema, y puede ser empleado de manera confiable para estimar la eficiencia del tratamiento en función de la dosis del coagulante natural. Esta capacidad predictiva resulta fundamental para el diseño y optimización de procesos de clarificación de agua basados en tecnologías sostenibles.

4.3.3 Efecto de la degradación de la turbiedad en el pH del agua

Tabla 18

Efecto de la degradación de la turbiedad en el pH

Jarra Nro.	Turbiedad final, τ (NTU)	pH (inicial)	pH (final)
1	15,41	8,21	8,20
2	14,35	8,21	8,24
3	14,18	8,21	8,25
4	11,56	8,21	8,28
5	10,90	8,21	8,23
6	9,71	8,21	8,25

La Tabla 18, presenta la evolución del pH del agua en relación con la disminución de la turbiedad final tras el tratamiento con coagulante natural. En todos los casos, se parte de un pH inicial constante de 8,21, lo que garantiza condiciones de referencia homogéneas.

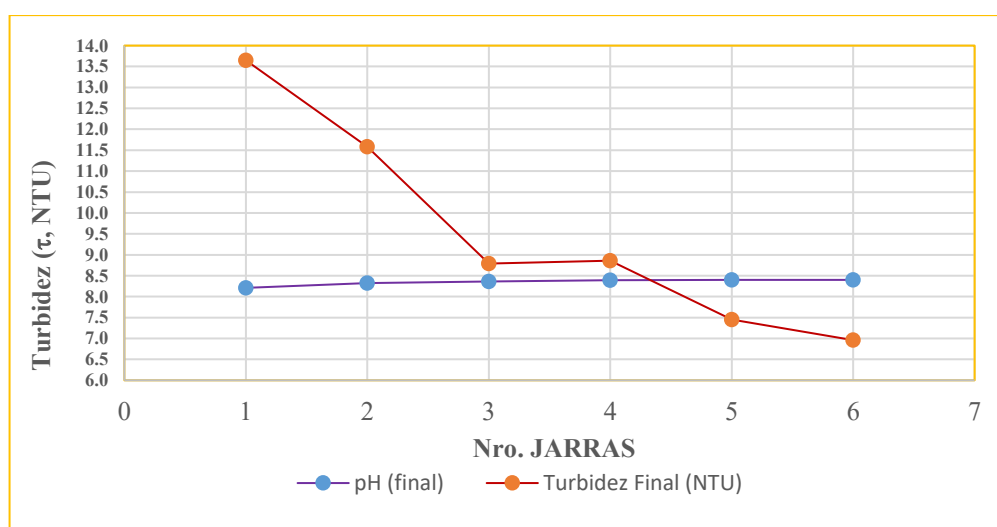
A medida que la turbiedad disminuye, se observa una ligera variación positiva en el pH final, con un cambio máximo de apenas 0,07 unidades de pH, registrado en la jarra Nro. 4. Esta variación, es considerada insignificante desde el punto de vista técnico y sanitario, según los criterios establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS), los cuales indican que fluctuaciones menores a $\pm 0,2$ unidades no comprometen la calidad del agua.

Es importante destacar que la escala de pH es logarítmica, por lo tanto, pequeñas variaciones numéricas no necesariamente implican cambios químicos relevantes, especialmente cuando los valores permanecen dentro del rango aceptable para el consumo humano (6,5 - 8,5 según la OMS).

En consecuencia, estos resultados confirman que la aplicación del coagulante natural no afecta de manera significativa el equilibrio ácido - base del sistema acuoso, manteniendo el pH dentro de márgenes seguros para la salud y compatibles con normativas ambientales. Además, la estabilidad observada refuerza la idoneidad del coagulante para procesos de tratamiento de agua, donde se requiere preservar parámetros físico - químicos esenciales sin necesidad de correcciones adicionales.

Figura 21

Efecto de la degradación de la turbiedad en el pH del agua



La figura 21, muestra una ligera variación visual positiva del pH con la degradación de la turbiedad, pero como en el primer caso, es una variación que se encuentra dentro del rango de insignificante (OMS).

4.3.4 Efecto de la degradación de la turbiedad en la conductividad eléctrica del agua

La conductividad inicial, se mantuvo constante en todas las jarras (4800 $\mu\text{S}/\text{cm}$), lo cual asegura condiciones homogéneas para el análisis comparativo. Luego del tratamiento, la conductividad eléctrica final disminuyó levemente en todas las jarras, con valores que oscilaron entre 4740 y 4786 $\mu\text{S}/\text{cm}$, observándose la reducción máxima de 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$, que corresponde a una disminución relativa de solo 1,25 %, que es considerado marginal y no significativo desde el punto de vista hidro químico.

4.4. Tercera prueba de Coagulación/floculación y sedimentación

Con base en los resultados obtenidos en las dos primeras pruebas de jarras, en las cuales se observó una tendencia clara de mejora en la remoción de turbiedad con el incremento de la dosis del coagulante natural, pero sin evidenciar aún un punto de saturación o meseta en la eficiencia del proceso, se procedió a realizar una tercera serie de ensayos orientada a la determinación de la dosis óptima.

Para esta nueva etapa experimental, se tomó como valor de referencia la dosis utilizada en la jarra N.º 6 (60 mg/L) —que previamente mostró la mayor eficiencia relativa— y se diseñó una secuencia de incrementos progresivos de 4 mg/L, evaluando las siguientes concentraciones: 60, 64, 68, 72, 76 y 80 mg/L.

El objetivo de esta tercera serie de pruebas fue identificar el punto de inflexión de la curva de eficiencia, es decir, la dosis a partir de la cual aumentos adicionales en la concentración del coagulante no generan mejoras significativas en la remoción de turbiedad. Este enfoque permite no solo maximizar la eficiencia técnica del tratamiento, sino también optimizar el uso del coagulante desde una perspectiva económica y ambiental, evitando sobredosificaciones innecesarias que podrían implicar impactos colaterales o un uso ineficiente de recursos naturales.

4.4.1 Resultados de la tercera prueba de jarras

Es importante señalar que, en esta prueba, también se trata agua de diferente turbiedad inicial, producto de la variabilidad de la intensidad de las precipitaciones como en los dos casos anteriores.

Tabla 19*Resultados de la tercera prueba de jarras de coagulación/ floculación y sedimentación*

Variables \ Jarras	1	2	3	4	5	6
Turbidez inicial (τ , NTU)	419	419	419	419	419	419
pH (inicial)	8,38	8,38	8,38	8,38	8,38	8,38
Conductividad inicial ($\mu\text{S/cm}$)	4478	4478	4478	4478	4478	4478
Dosis coagulante (C, mg/L)	60	64	68	72	76	80
Volumen coagulante (mL)	6,0	6,4	6,8	7,2	7,6	8,0
Velocidad mezcla rápida (rpm)	150	150	150	150	150	150
Tiempo mezcla rápida (s)	10	10	10	10	10	10
Velocidad mezcla lenta (rpm)	20	20	20	20	20	20
Tiempo mezcla lenta (min)	20	20	20	20	20	20
Tiempo sedimentación (min)	30	30	30	30	30	30
Turbidez final (τ , NTU)	8,23	5,70	4,94	4,65	8,39	8,86
pH (final)	8,35	8,36	8,36	8,39	8,36	8,37
Conductividad final ($\mu\text{S/cm}$)	4350	4326	4314	4301	4296	4308

Los resultados de la tabla 19, muestran un hecho singular, al ser comparadas con las dos observaciones anteriores, pues aparece un punto de inflexión en la tendencia de a mayor dosis de coagulante mayor degradación de la turbiedad, dado que esta tendencia se mantiene hasta la jarra 4, pero a partir de ella, se produce lo contrario, es decir, pierde eficacia la coagulación y aparece un aumento en la turbiedad, fenómeno al que se conoce como la “coagulación inversa”, producto de la sobre saturación del coagulante, que indica que se alcanzó el “punto crítico” o la “dosis óptima” de coagulante para la máxima degradación de la turbiedad del agua cruda procesada.

4.4.2 Análisis estadístico de los datos obtenidos en la tercera prueba de jarras

Tabla 20

Degradación de la turbiedad

JARRA Nro.	Dosis coagulante (C, mg/L)	Turbidez inicial τ , (NTU)	Turbidez final τ , (NTU)	Degradación de la turbidez (%)
1	60	419	8,23	98,04
2	64	419	5,7	98,64
3	68	419	4,94	98,82
4	72	419	4,65	98,89
5	76	419	8,39	98,00
6	80	419	8,86	97,89

La Tabla 20, presenta los resultados obtenidos en la tercera serie de pruebas de jarras, orientadas a identificar la dosis óptima del coagulante natural en función de su capacidad para reducir la turbiedad del agua. En todos los ensayos se mantuvo constante la turbiedad inicial (419 NTU), lo que permite una comparación directa de la eficiencia de remoción entre diferentes concentraciones del coagulante.

Se observa una mejora progresiva en la eficiencia de remoción de turbiedad desde la jarra N.º 1 (60 mg/L) hasta la jarra N.º 4 (72 mg/L), donde se alcanza una eficiencia máxima del 98,89 %, correspondiente a una turbiedad final de 4,65 NTU. Sin embargo, a partir de ese punto, en las jarras N.º 5 (76 mg/L) y N.º 6 (80 mg/L), se evidencia una disminución en la eficiencia de remoción (98,00 % y 97,89 %, respectivamente), lo que indica una inflexión en la tendencia ascendente previamente observada.

Este comportamiento sugiere la ocurrencia del fenómeno conocido como sobredosificación o coagulación inversa (punto critico), caracterizado por la pérdida de eficiencia a partir de una concentración crítica del coagulante. Este efecto se explica por la excesiva saturación de cargas en el sistema, lo que inhibe la formación estable de flóculos al generar repulsión electrostática entre las partículas tratadas. Como consecuencia, los agregados formados se fragmentan o se re-dispersan, disminuyendo la efectividad del proceso de clarificación.

Desde un enfoque técnico-ambiental, la identificación precisa de este umbral, es fundamental para garantizar la eficiencia del proceso y, al mismo tiempo, evitar el uso excesivo de insumos, lo cual representa una mejora en la sostenibilidad operativa del tratamiento. En este sentido, la dosis correspondiente a la jarra N.º 4 (72 mg/L) se perfila como la dosis óptima, al combinar la máxima eficiencia de remoción con un uso racional de recursos, reduciendo la posibilidad de efectos adversos por exceso de coagulante en el efluente tratado.

Este hallazgo es de suma importancia, puesto que marca el límite máximo de la degradación de la turbidez y la dosis máxima de coagulante que debiera aplicarse al agua turbia, y es esta la dosis de coagulante que se trata de determinar para cada proceso de clarificación del agua, por tener implicancias técnicas y económicas.

Tabla 21

Dosis óptima del coagulante para la máxima degradación de turbiedad

JARRA Nro.	DOSIS COAGULANTE, C (mg/L)	TURBIEDAD FINAL, τ (NTU)
1	60	8,23
2	64	5,70
3	68	4,94
4	72	4,65
5	76	8,39
6	80	8,86

Con base en los resultados analizados en la Tabla 20, se extrae la información necesaria para la tabla 21, con la finalidad de realizar un ajuste matemático que permita identificar con mayor precisión la dosis óptima del coagulante natural asociada a la máxima eficiencia en la remoción de turbiedad. Los datos muestran que la turbiedad final disminuye progresivamente hasta alcanzar un mínimo en la jarra N.º 4 (72 mg/L), y posteriormente vuelve a incrementarse en las jarras N.º 5 y 6, a pesar del aumento en la dosis del coagulante.

Este comportamiento indica el inicio del fenómeno conocido como coagulación inversa, el cual se manifiesta típicamente a partir de una dosis crítica del coagulante, más allá de la cual

el sistema pierde eficiencia debido a la sobresaturación de cargas y la desestabilización de los flóculos.

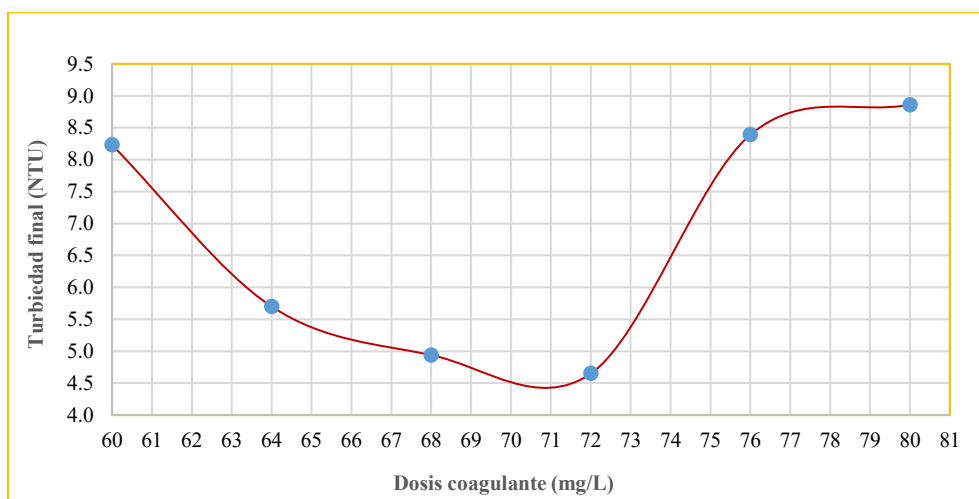
La inflexión observada entre las jarras N.º 4 y 5 sugiere que la dosis óptima se encuentra en el intervalo comprendido entre 72 y 76 mg/L, rango dentro del cual se alcanza el valor mínimo de turbiedad final (4,65 NTU). Este hallazgo es de gran relevancia técnica y operativa, ya que define el límite superior eficiente para la aplicación del coagulante, tanto desde el punto de vista del rendimiento del proceso como de la sostenibilidad del mismo.

Determinar con precisión este valor óptimo, es esencial en cualquier sistema de clarificación, dado que permite maximizar la eficiencia del tratamiento, reducir el uso innecesario de insumos, y minimizar costos operativos, así como evitar impactos ambientales derivados del exceso de coagulante en el efluente tratado.

En esta etapa, se procederá a ajustar un modelo matemático adecuado (e.g., polinómico, logístico o de regresión no lineal) a los datos experimentales, con el objetivo de interpolar el valor correspondiente a la dosis óptima y, eventualmente, desarrollar una herramienta predictiva para futuras aplicaciones del coagulante natural en sistemas reales de tratamiento de agua.

Figura 22

Degradación de la turbiedad y dosis óptima del coagulante



De acuerdo a la figura 22, podemos concluir que, existe una posible correlación entre la variable independiente y dependiente mediante un modelo de curva cóncava hacia arriba y con un único mínimo, en base a esta observación, procedemos con el análisis correspondiente.

4.4.3 Análisis y modelamiento de la data de la tercera prueba de jarras

La información analizada, señala que la correlación entre la variable independiente y la variable dependiente, cuando aparece un punto de inflexión en la degradación de la turbidez, es una curva cóncava hacia arriba y como se observa en la fig. 21, este tiene un solo mínimo, por lo que, podría ajustarse a un modelo matemático de un polinomio de segundo grado (cuadrático):

$$\hat{\tau} = DC^2 + BC + A, \text{ donde } D > 0, \text{ para que la curva sea cóncava hacia arriba.}$$

Observando la figura 21 y el comportamiento de la Turbiedad final, τ (NTU) y la dosis del coagulante, C (mg/L), reescribimos la ecuación de modelamiento cuadrático:

$$\hat{\tau} = A + B * C + D * C^2$$

Los parámetros (A), (B) y (D) tienen significados específicos en el contexto de la coagulación y el efecto del coagulante natural en la turbiedad del agua, así:

A: Representa la turbiedad (NTU) inicial o turbiedad antes de añadir el coagulante ($C = 0$, mg/L).

B: Es el coeficiente que indica, cómo varía la turbiedad en función de la concentración del coagulante (C , mg/L) de manera lineal. Si el valor de B es negativo, implica que la efectividad del proceso aumenta, ya que la turbiedad disminuye con el incremento de la concentración del coagulante. Si B fuera positivo, la efectividad del proceso se reduce, lo que se traduce en un aumento de la turbiedad.

D: Representa el efecto cuadrático de la concentración del coagulante (C , mg/L) sobre la turbiedad ($\hat{\tau}$, NTU). Si D es positivo, la relación es cóncava hacia arriba, lo que significa que hay un punto óptimo (punto crítico) de concentración del coagulante

para minimizar la turbiedad, después de ese punto, la turbiedad aumenta, presentándose la coagulación inversa.

Finalmente, podemos decir que el modelo, sugiere que la turbiedad del agua, se ve afectada lineal y cuadráticamente por la concentración del coagulante (C , mg/L), y los parámetros A , B y D permiten ilustrar el comportamiento de la turbiedad con la adición del coagulante natural.

Con el ajuste necesario, se determinaron los valores de los parámetros:

$$A = 180,08; B = -5,0782 \text{ y } D = 0,0368$$

Quedando la ecuación cuadrática definida así:

$$\hat{\tau} = 180,08 - 5,0782 * C + 0,0368 * C^2$$

Para hallar la concentración crítica de dosis del coagulante (C_C), se deriva la expresión anterior y se iguala a cero;

$$\frac{d\hat{\tau}}{dC} = -5,0782 + 2 * 0,0368 * C ,$$

$$\frac{d\hat{\tau}}{dC} = 0 , \text{ entonces}$$

$C = 68,9973 \cong 69$ mg/L, que equivaldría a la concentración de coagulante para la máxima degradación de la turbiedad o dosis óptima, a partir del cual, se inicia la coagulación inversa.

Con esta dosis de coagulante, se estima la turbiedad final:

$\hat{\tau} = 4,8889$ NTU, turbidez final mínima o remanente estimada para la dosis optima de coagulante. Valor muy próximo al resultado obtenido en laboratorio.

Tabla 22

Turbiedad final medido y turbiedad final estimada y dosis de coagulante

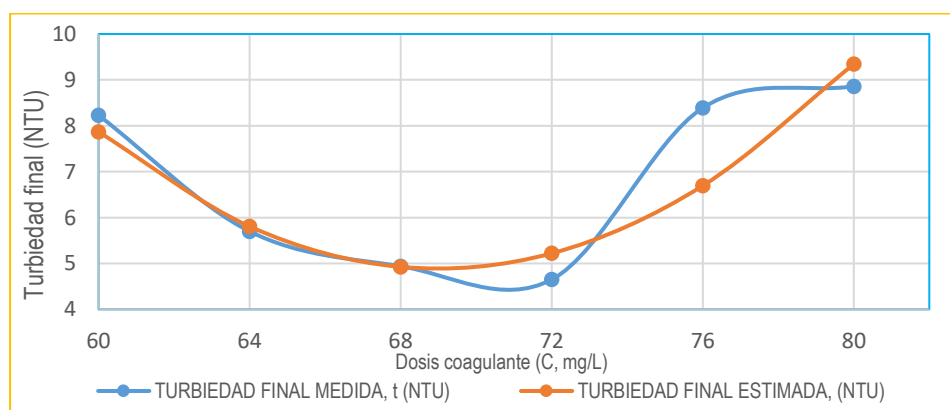
DOSIS COAGULANTE (C, mg/L)	TURBIEDAD FINAL MEDIDA τ (NTU)	TURBIEDAD FINAL ESTIMADA, $\hat{\tau}$ NTU
60	8,23	7,868
64	5,7	5,808
68	4,94	4,926
72	4,65	5,221
76	8,39	6,694
80	8,86	9,344

La Tabla 22, presenta la comparación entre los valores medidos experimentalmente de turbiedad final y los valores estimados mediante un modelo cuadrático, en función de la dosis del coagulante natural. Se observa una alta proximidad entre ambos conjuntos de datos, lo que sugiere que el modelo ajustado representa adecuadamente el comportamiento del sistema en el rango de concentraciones evaluado (60–80 mg/L).

La concordancia entre los datos experimentales y los valores estimados respalda la validez estadística y funcional del modelo cuadrático, especialmente considerando que logra capturar tanto la fase de eficiencia creciente (hasta los 72 mg/L) como la posterior pérdida de rendimiento atribuida al fenómeno de coagulación inversa.

Figura 23

Turbiedad final medida y turbiedad final estimada



La figura 23, reproduce el modelo satisfactoriamente el mínimo de la curva, que corresponde a la dosis óptima, así como la tendencia ascendente en la turbiedad final cuando se

supera dicho umbral. La curva que corresponde a la ecuación de simulación cuadrática, presenta un coeficiente de correlación de Pearson de $R = 0,9001$, fuerte relación lineal entre las variables y el coeficiente de determinación $R^2 = 0,8102$ (81,02%), que significa que el modelo podría explicar la variabilidad de la variable dependiente en función de la variable independiente en esa proporción.

Este ajuste, no solo permite describir el comportamiento no lineal del proceso, sino que además proporciona una herramienta cuantitativa útil para la predicción de la eficiencia del tratamiento en función de la dosis del coagulante, con aplicaciones prácticas en el diseño, control y optimización de procesos de clarificación de agua.

En conjunto, los resultados que incluye la figura, permiten concluir que la función cuadrática utilizada, es adecuada para modelar la relación entre la dosis de coagulante natural y la turbiedad final del agua tratada, ofreciendo una representación confiable del fenómeno y contribuyendo a la toma de decisiones fundamentadas para el uso racional del insumo.

4.4.4 Efecto de la degradación de la turbiedad en el pH del agua

Tabla 23

Efecto de la degradación de la turbidez en el pH

Jarra Nro.	pH (inicial)	pH (final)	Turbiedad final (NTU)
1	8,38	8,35	8,23
2	8,38	8,36	5,70
3	8,38	8,36	4,94
4	8,38	8,39	4,65
5	8,38	8,36	8,39
6	8,38	8,37	8,86

El pH, es ligeramente afectado por la degradación de la turbiedad y la dosis del coagulante, pues en el primer tramo disminuye hasta en $-0,03$ unidades y en otro aumenta hasta en $+0,01$ unidades, estando en el rango de insignificancia.

4.4.5 Efecto de la degradación de la turbidez en la conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica, también es afectada por la degradación de la turbiedad y la dosis del coagulante, descendiendo su conductividad hasta en 3,6% (promedio aritmético), disminución que se puede explicar como consecuencia de la coagulación y floculación de las partículas y/o iones conductores presentes en los coloides y partículas suspendidas, pero que no significa riesgo para la calidad del agua.

4.5. Cuarta prueba de Coagulación/floculación y sedimentación

Esta prueba de jarras es similar a la tercera prueba, pues se realiza, en las mismas condiciones operativas, pero con una turbiedad inicial diferente del agua, turbiedad explicada por la variación de la intensidad de las lluvias. Con esta prueba, se buscó confirmar la coagulación inversa, manifestada en la prueba anterior.

4.5.1 Resultados de la cuarta prueba de jarras

Tabla 24

Resultados de la cuarta prueba de jarras de coagulación/ floculación y sedimentación

Variables \ Jarras	1	2	3	4	5	6
Turbidez inicial (τ , NTU)	281	281	281	281	281	281
pH (inicial)	8,35	8,35	8,35	8,35	8,35	8,35
Conductividad inicial ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	4334	4334	4334	4334	4334	4334
Dosis coagulante (C, mg/L)	60	64	68	72	76	80
Volumen coagulante (mL)	6,0	6,4	6,8	7,2	7,6	8,0
Mezcla rápida (rpm)	150	150	150	150	150	150
Tiempo mezcla rápida (s)	10	10	10	10	10	10
Mezcla lenta (rpm)	20	20	20	20	20	20
Tiempo mezcla lenta (min)	20	20	20	20	20	20
Tiempo de sedimentación (min)	30	30	30	30	30	30
Turbidez final (τ , NTU)	9,83	7,8	6,92	5,38	9,44	9,82
pH (final)	8,38	8,38	8,37	8,36	8,36	8,36
Conductividad final ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	4320	4307	4302	4286	4310	4300

La tabla 24, como las anteriores, muestra las propiedades físico químicas iniciales y finales del agua cruda y agua procesada. En este caso, también, aparece el punto de quiebre o inflexión e inicio de la coagulación inversa a partir de la jarra 4, siendo para esta jarra la mayor degradación de la turbiedad, que corresponde a una dosis de coagulante de 72 mg/L.

4.5.2 Análisis estadístico de los datos obtenidos en la cuarta prueba de jarras

Tabla 25

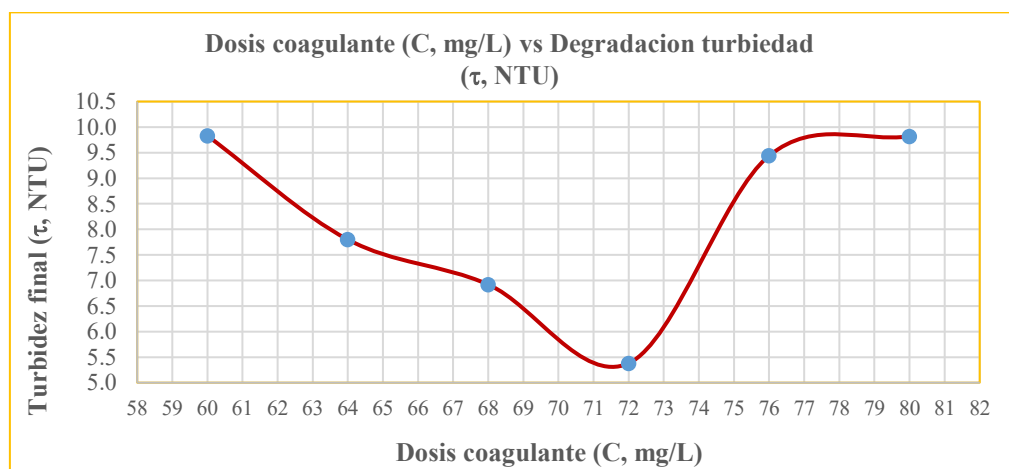
Degradación de la turbiedad y dosis del coagulante

Jarra Nro.	Dosis coagulante (mg/L)	Turbiedad inicial, τ (NTU)	Turbiedad final, τ (NTU)	Degradación turbiedad (%)
1	60	281	9,83	96,50
2	64	281	7,8	97,22
3	68	281	6,92	97,54
4	72	281	5,38	98,09
5	76	281	9,44	96,64
6	80	281	9,82	96,51

En la tabla 25, se observa que, para la jarra 4 la degradación de la turbidez alcanza el 98,09 %, para disminuir notoriamente en las jarras 5 y 6, lo que significa haber alcanzado el punto crítico o inicio de la coagulación inversa entre las jarras 4 y 5.

Figura 24

Degradación de la turbiedad (τ , NTU), dosis óptima coagulante (C , mg/L) y coagulación inversa



La Figura 24, ilustra con claridad la presencia de un punto de inflexión en la curva de degradación de la turbiedad, ubicado entre las jarras 3 y 4. Este punto, conocido como punto

crítico, marca el límite a partir del cual el incremento en la dosis del coagulante deja de generar mejoras significativas y, por el contrario, inicia una disminución en la eficiencia del proceso, fenómeno identificado como coagulación inversa.

En este intervalo, se encuentra la dosis óptima del coagulante, entendida como aquella que permite alcanzar la máxima remoción de turbiedad antes de que se manifieste una sobresaturación del sistema. La forma de la curva - cóncava hacia arriba y con un único mínimo - sugiere una relación cuadrática entre la concentración del coagulante (C , mg/L) y la turbiedad residual (τ , NTU), lo cual respalda la existencia de una dosis ideal técnicamente justificable.

A partir del análisis gráfico, se estima que la dosis óptima para lograr la mayor eficiencia en la clarificación del agua se encuentra en torno a los 71,5 mg/L. Este valor constituye un parámetro de interés práctico, ya que permite optimizar el uso del coagulante, reduciendo costos operativos y minimizando impactos ambientales asociados a su uso excesivo o innecesario.

4.5.3 Análisis y modelamiento de la data de la cuarta prueba experimental

Observando el comportamiento de la Turbiedad final, τ (NTU) frente a la dosis de coagulante, C (mg/L), se ve que la curva es cóncava hacia arriba y con un único mínimo, similar a la de la prueba tres, por tanto, para el ajuste se utiliza la ecuación:

$$\hat{\tau} = A + B * C + D * C^2$$

Realizando el ajuste necesario, se llega a la expresión:

$$\hat{\tau} = 180.08 - 5.0782 \times C + 0.0368 \times C^2$$

Para hallar la concentración crítica de dosis del coagulante (C_c), se deriva la expresión anterior y se iguala a cero;

$$\frac{d\hat{\tau}}{dC} = -5.0782 + 2(0.0368) \times C$$

$$\frac{d\hat{\tau}}{dC} = 0$$

De tal manera que:

$$\frac{d\hat{\tau}}{dC} = -5.0782 + 2(0.0368) \times C = 0$$

De donde

$$C_C = 68.9973 \cong 69 \text{ mg/L}$$

Con esta información se estima la turbiedad remanente

$$\hat{\tau}_{(C_C=69)} = 8.889 \text{ NTU}$$

Tabla 26

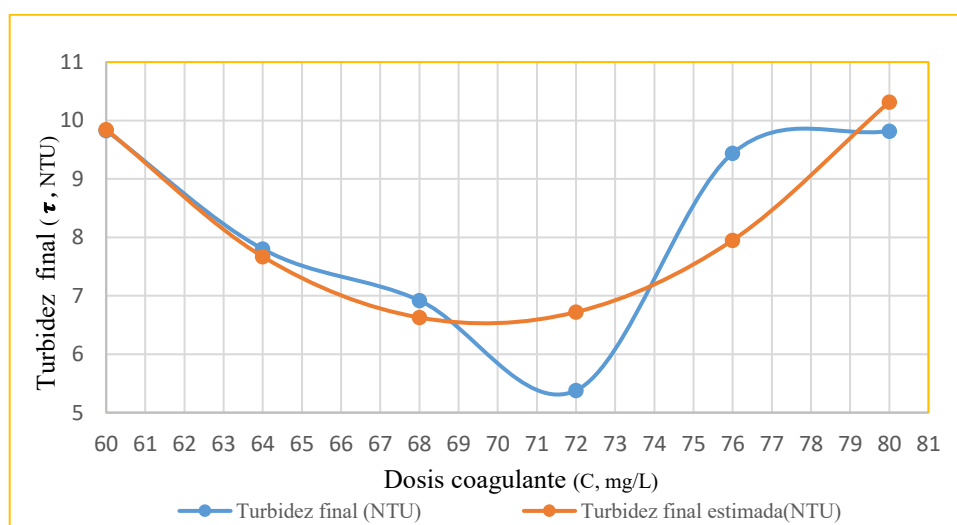
Turbiedad final medido, turbiedad final estimada y dosis de coagulante

Dosis coagulante (mg/L)	Turbiedad final (τ , NTU)	Turbiedad final estimada, ($\hat{\tau}$, NTU)
60	9.83	9.85
64	7.80	7.67
68	6.92	6.23
72	5.38	6.72
76	9.44	7.95
80	9.82	10.32

La tabla 26, muestra una proximidad importante entre la data empírica de la turbiedad final y la turbiedad final estimada con la ecuación cuadrática.

Figura 25

Turbiedad final, (τ , NTU) y Turbiedad final estimada ($\hat{\tau}$, NTU) en función de la Dosis coagulante (C , mg/L).



La Figura 25, muestra la comparación gráfica entre los valores empíricos de turbiedad y los estimados mediante el modelo cuadrático ajustado. El coeficiente de correlación de

Pearson obtenido ($R = 0,8583$) indica una asociación positiva fuerte entre la dosis de coagulante (C, mg/L) y la respuesta del modelo, aunque este coeficiente es más apropiado para evaluar relaciones lineales. En este contexto, el coeficiente de determinación ($R^2 = 73,76\%$) representa una medida más relevante, ya que indica que aproximadamente el 74% de la variabilidad en la turbiedad final (τ , NTU) puede explicarse por los cambios en la concentración del coagulante, conforme al modelo cuadrático propuesto.

Este nivel de ajuste es estadísticamente aceptable para procesos de naturaleza no lineal como la coagulación, y respalda la validez del modelo para describir el comportamiento del sistema dentro del rango experimental evaluado. Tal como se observó anteriormente, las dosis superiores al punto crítico no aportan beneficios adicionales en términos de eficiencia y, en algunos casos, pueden deteriorar la calidad del tratamiento debido al fenómeno de coagulación inversa. Por tanto, su análisis carece de valor práctico y operativo dentro de un enfoque de optimización técnica y ambiental.

Gráficamente, considerando la curva empírica como la estimada, la dosis optima de coagulante se encuentra entre 69 y 72 mg/L (69 ppm – 72 ppm), concordante con lo estimado de 69 mg/L, que confirma que el modelo de ajuste es el adecuado, a partir de este punto se produce la coagulación inversa.

4.5.4 Efecto de la degradación de la turbiedad en el pH

Tabla 27

Efecto de la degradación de la turbiedad en el pH

Jarra Nro.	Turbidez final (τ , NTU)	pH (inicial)	pH (final)
1	9,83	8,35	8,38
2	7,80	8,35	8,38
3	6,92	8,35	8,37
4	5,38	8,35	8,36
5	9,44	8,35	8,36
6	9,82	8,35	8,36

El pH, nuevamente es afectado ligeramente por la degradación de la turbiedad, con una elevación de hasta 0,03 unidades en el rango más amplio, resultando insignificante como en el caso anterior. No representa riesgo para la calidad del agua, la salud ni el ambiente.

4.5.5 Efecto de la degradación de la turbiedad en la conductividad del agua

La conductividad eléctrica del agua procesada disminuye hasta en un 0,693 % en promedio aritmético, cuestión que podría explicarse como consecuencia de la coagulación/floculación y sedimentación, que atrapa y arrastra partículas cargadas negativamente, que significa disminución de la conductividad eléctrica del agua. Esta variación no es riesgo para la calidad del agua ni la salud, por tanto, es insignificante.

4.6. Quinta prueba de Coagulación/floculación y sedimentación

Concluida las pruebas de jarras correspondientes al periodo de precipitaciones del primer semestre del año 2024, se esperó el nuevo periodo de precipitaciones que comenzó a finales del mes de noviembre del 2024. Con los mismos criterios previos, se procedió a muestrear el agua del río Tenerías, del distrito de San Sebastián, provincia y departamento de Cusco.

Con el objetivo de confirmar la potencia coagulante de la solución de la harina de haba cruda, confirmar la existencia de un punto de inflexión e inicio de la coagulación inversa, se optó por aplicar la solución coagulante con una dosificación de 60, 70, 80, 90, 100 y 110 mg/L por jarra, de modo que la observación pudiera ser sobre un panorama más amplio y práctico.

Es importante resaltar, que para este caso y los casos anteriores el agua procesada es de ocurrencia natural y la turbiedad inicial es consecuencia de las precipitaciones anuales.

4.6.1 Resultados de la coagulación/floculación y sedimentación de la quinta prueba. de jarra

Tabla 28

Concentración de la solución coagulante 1% p/v. Temperatura ambiental: 15.1oC

Variables \ Jarras	1	2	3	4	5	6
Turbiedad inicial (τ , NTU)	88,2	88,2	88,2	88,2	88,2	88,2
pH (inicial)	8,10	8,10	8,10	8,10	8,10	8,10
Conductividad inicial (μ S/cm)	3650	3650	3650	3650	3650	3650
Dosis coagulante (mg/L)	60	70	80	90	100	110
Volumen coagulante (mL)	6	7	8	9	10	11
Mezcla rápida (rpm)	150	150	150	150	150	150
Tiempo mezcla rápida (s)	10	10	10	10	10	10
Mezcla lenta (rpm)	20	20	20	20	20	20
Tiempo mezcla lenta (min)	20	20	20	20	20	20
Tiempo de sedimentación (min)	30	30	30	30	30	30
Turbiedad final (τ , NTU)	10,35	9,91	9,2	9,08	9,14	9,57
pH (final)	8,14	8,17	8,16	8,17	8,2	8,17
Conductividad final (μ S/cm)	3530	3570	3460	3580	3530	3600

La tabla 28, muestra el resultado de la degradación de la turbidez del agua, partiendo de una turbidez inicial de 88,2 NTU, turbiedad real de la fuente utilizada (noviembre de 2024) a inicios de las precipitaciones del año.

En la tabla, se distingue nuevamente el punto de inflexión en el progreso de la degradación de la turbiedad, entre la jarra 4 y 5, que indica haber alcanzado el punto crítico, que marca el inicio de la “coagulación inversa”, este punto crítico, corresponde a la dosis óptima del coagulante para la máxima degradación de la turbiedad.

4.6.2 Análisis estadístico de los datos obtenidos en la quinta prueba de jarras

Tabla 29

Degradación de la turbiedad y dosis óptima del coagulante

Jarra Nro.	Dosis coagulante (C, mg/L)	Turbidez inicial, τ (NTU)	Turbidez final, τ (NTU)	Degradación turbidez (%)
1	60	88,2	10,35	88,27
2	70	88,2	9,91	88,76
3	80	88,2	9,20	89,57
4	90	88,2	9,08	89,71
5	100	88,2	9,14	89,64
6	110	88,2	9,57	89,15

La Tabla 29, muestra la evolución de la eficiencia en la remoción de turbiedad en función de dosis crecientes del coagulante natural, manteniendo constante la turbiedad inicial (88,2 NTU) en todos los ensayos. Se observa una mejora sostenida en la eficiencia del tratamiento desde la jarra N.º 1 (60 mg/L) hasta la jarra N.º 4 (90 mg/L), donde se alcanza una degradación máxima del 89,71 %, lo que representa el mejor desempeño del proceso dentro del rango evaluado.

No obstante, a partir de esta dosis, se evidencia una inflexión en la tendencia positiva, ya que las jarras N.º 5 (100 mg/L) y N.º 6 (110 mg/L) presentan una ligera disminución en la eficiencia de remoción, con valores de 89,64 % y 89,15 % respectivamente. Aunque estas diferencias son relativamente pequeñas, son consistentes y técnicamente relevantes, indicando el inicio del fenómeno conocido como coagulación inversa.

Este fenómeno se produce cuando se supera la dosis crítica del coagulante, lo cual puede inducir una sobresaturación de cargas en el sistema, afectando negativamente la estabilidad de los flóculos formados. Como resultado, estos pueden perder cohesión, fragmentarse o incluso re dispersarse en el medio, reduciendo la eficacia del tratamiento.

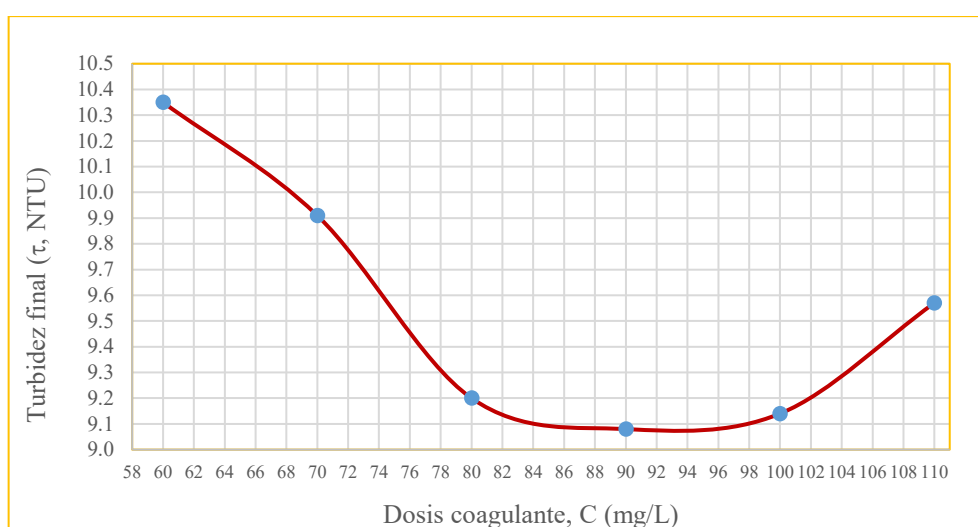
Desde una perspectiva operativa y ambiental, la identificación de esta dosis umbral es esencial. Superar el punto óptimo no solo disminuye la eficiencia del proceso, sino que implica

un uso innecesario de insumos, lo que incrementa los costos de operación y puede generar impactos ambientales adversos debido a la presencia de residuos químicos no aprovechados en el efluente.

En este contexto, la dosis de 90 mg/L se perfila como el valor óptimo, ya que representa el equilibrio entre máxima eficiencia de remoción de turbiedad y uso racional del coagulante, en línea con los principios de sostenibilidad y eficiencia en el tratamiento de aguas turbias.

Figura 26

Degradación de la turbiedad y dosis optima del coagulante



De la figura 26, visualmente podemos inferir que la dosis óptima de coagulante para este caso sería de 90 mg/L. La figura también sugiere, un comportamiento cóncavo hacia arriba, con único mínimo, pudiendo optarse, por un ajuste con un modelo matemático cuadrático.

4.6.3 Análisis y modelamiento de la data de la quinta prueba

Habiendo observado el comportamiento de la Turbiedad final (τ , NTU) frente a la dosis del coagulante, (C , mg/L), deducimos que es un comportamiento cóncavo hacia arriba, con único mínimo, de la forma:

$$\hat{\tau} = A + B \times C + D \times C^2$$

Realizando el ajuste necesario, se llega a la expresión:

$$\hat{\tau} = 20.278 - 0.24364 \times C + 0.001327 \times C^2$$

Para hallar la concentración crítica de dosis del coagulante (C_C), se deriva la expresión anterior y se iguala a cero;

$$\frac{d\hat{\tau}}{dC} = -0.24364 + 2(0.001327) \times C$$

$$\frac{d\hat{\tau}}{dC} = 0$$

De tal manera que:

$$\frac{d\hat{\tau}}{dC} = -0.24364 + 2(0.001327) \times C = 0, \text{ de donde:}$$

$$C_C = 91.8159 \text{ mg/L, dosis critica del coagulante.}$$

Con este valor, se estima la turbiedad final remanente mínima en el punto crítico:

$$\hat{\tau}_{(C_C=91.8159)} = 9.0948 \text{ NTU}, \text{ muy próximo al medido que fue de 9,08 NTU.}$$

Tabla 30

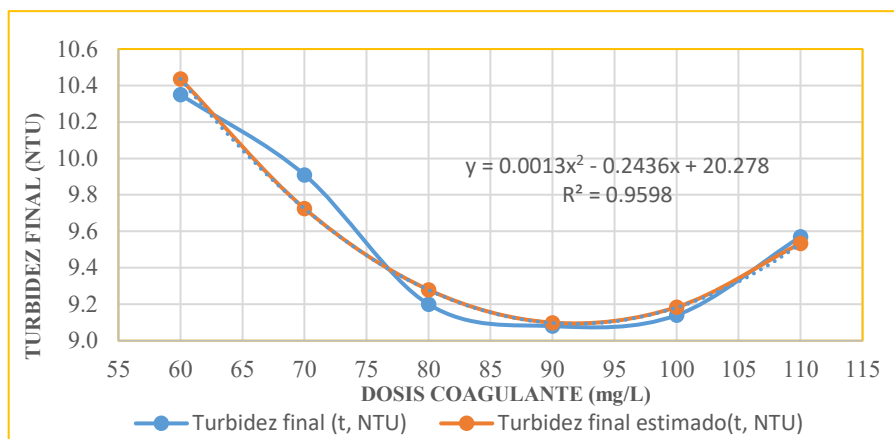
Dosis de coagulante, turbiedad final y turbiedad final estimada

Jarra Nro.	Dosis coagulante (mg/L)	Turbidez final τ , (NTU)	Turbidez final estimado $\hat{\tau}$, (NTU)
1	60	10,35	10,4368
2	70	9,91	9,7255
3	80	9,2	9,2796
4	90	9,08	9,0991
5	100	9,14	9,184
6	110	9,57	9,5343

La tabla 30, muestra una proximidad muy alta entre la data empírica de la turbiedad final y la turbiedad final estimada con el modelo cuadrático, prácticamente hay una coincidencia, lo que habla de la validez del modelo seleccionado.

Figura 27

Dosis de coagulante, turbiedad final, τ (NTU) y turbiedad final estimada, $\hat{\tau}$ (NTU)



La Figura 27, muestra la comparación entre los valores de turbiedad final obtenidos experimentalmente y aquellos estimados mediante el modelo cuadrático ajustado. La alta proximidad entre ambas curvas confirma la capacidad del modelo para describir con precisión el comportamiento del sistema.

El coeficiente de correlación de Pearson ($R = 0,9797$) indica una asociación muy fuerte entre las variables modeladas, mientras que el coeficiente de determinación ($R^2 = 95,98\%$) revela que aproximadamente el 96% de la variabilidad en la turbiedad final puede ser explicada por los cambios en la dosis del coagulante (C , mg/L). Este elevado nivel de ajuste valida estadísticamente el modelo propuesto y respalda su aplicabilidad práctica en el diseño y optimización de procesos de clarificación con coagulantes naturales.

Tanto en la curva empírica como en la estimada, se identifica con claridad un mínimo global en torno a los 90 mg/L, correspondiente a la dosis óptima de coagulante, valor a partir del cual se observa una pérdida de eficiencia asociada a la coagulación inversa. Esta identificación es clave para establecer directrices de dosificación eficientes, que aseguren el máximo rendimiento del tratamiento con el menor impacto ambiental y económico posible.

4.6.1 Efecto de la degradación de la turbiedad en el pH del agua tratada

Tabla 31

Efecto de la degradación de la turbidez en el pH

Jarras Nro.	Turbidez final, τ (NTU)	pH (inicial)	pH (final)
1	10,35	8,10	8,14
2	9,91	8,10	8,17
3	9,2	8,10	8,16
4	9,08	8,10	8,17
5	9,14	8,10	8,20
6	9,57	8,10	8,17

La Tabla 31, presenta los valores de pH antes y después del tratamiento con coagulante natural, en función de la turbiedad final obtenida en cada jarra. El pH inicial se mantuvo constante en 8,10, lo que permite una evaluación objetiva del efecto del tratamiento sobre la variación de este parámetro.

Se observa un ligero incremento del pH final en todas las muestras, alcanzando un máximo de 0,10 unidades (de 8,10 a 8,20). Esta variación, aunque cuantificable, se considera insignificante desde el punto de vista técnico y sanitario, ya que permanece dentro del rango de aceptabilidad establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para agua potable, que es de 6,5 a 8,5.

Desde un punto de vista químico, este leve aumento en el pH podría estar asociado a la interacción de los compuestos presentes en el coagulante natural con las especies iónicas del sistema acuoso. En particular:

- La neutralización de cargas coloidales durante la coagulación, puede alterar el equilibrio ácido - base local, reduciendo la concentración de especies ácidas libres.
- La liberación de compuestos de naturaleza levemente alcalina (como aminoácidos, péptidos o minerales de origen vegetal) durante la disolución de la harina de haba puede contribuir marginalmente al incremento del pH.

A pesar de estas posibles interacciones, la estabilidad observada en los valores de pH confirma que el tratamiento no genera perturbaciones significativas en la composición química del agua. Por lo tanto, el uso del coagulante natural no representa un riesgo para la calidad del agua, ni para la salud pública ni para el medio ambiente. Además, este comportamiento minimiza la necesidad de etapas de corrección de pH, lo cual representa una ventaja operativa y económica frente a coagulantes químicos que sí alteran este parámetro de manera más pronunciada.

4.6.2 Efecto de la degradación de la turbiedad en la conductividad eléctrica del agua

La conductividad eléctrica del agua, luego de someterse a los procesos de coagulación, floculación y sedimentación, experimenta una ligera disminución en promedio aritmético de hasta un 2,88 %. Esta reducción, puede atribuirse a la coagulación que elimina iones o partículas con carga negativa durante el proceso. Sin embargo, esta variación no constituye riesgo para la calidad del agua, la salud ni el medio ambiente.

4.7. Sexta prueba de Coagulación/floculación y sedimentación

Esta prueba de jarras es casi una réplica de la quinta prueba de jarras, por lo que las condiciones operativas son las mismas, sin embargo, la turbiedad inicial es mayor, producto del incremento de las precipitaciones.

4.7.1 Resultados de la sexta prueba de jarras

Siendo esta prueba una réplica de la anterior, con la diferencia de que en este caso la turbiedad inicial del agua es mayor, producto de las mayores precipitaciones.

Tabla 32

Concentración de la solución coagulante 1% p/v. Temperatura muestra: 16.4°C

Variables \ Jarras	1	2	3	4	5	6
Turbidez inicial (τ , NTU)	114	114	114	114	114	114
pH (inicial)	8,09	8,09	8,09	8,09	8,09	8,09
Conductividad inicial ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	3550	3550	3550	3550	3550	3550
Dosis coagulante (mg/L)	60	70	80	90	100	110
Volumen coagulante (mL)	6	7	8	9	10	11
Mezcla rápida (rpm)	150	150	150	150	150	150
Tiempo mezcla rápida (s)	10	10	10	10	10	10
Mezcla lenta (rpm)	20	20	20	20	20	20
Tiempo mezcla lenta (min)	20	20	20	20	20	20
Tiempo de sedimentación (min)	30	30	30	30	30	30
Turbidez final (τ , NTU)	10,43	9,75	9,28	8,39	8,73	9,03
pH (final)	8,04	8,11	8,13	8,14	8,15	8,15
Conductividad final ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	3450	3440	3470	3430	3480	3360

En la Tabla 32 se evidencia un punto de inflexión en el comportamiento del sistema de coagulación. A partir de la jarra 4, la turbiedad residual comienza a incrementarse en las jarras 5 y 6, lo que indica una pérdida de eficiencia del coagulante. Esta tendencia sugiere un fenómeno de sobredosificación, en el cual el exceso de coagulante provoca la redispersión de los flóculos formados, generando un aumento en la turbiedad del agua tratada. Este fenómeno es conocido como coagulación inversa y marca el punto crítico del proceso, a partir del cual la adición adicional de coagulante deja de ser beneficiosa. De este modo, se determina la dosis óptima, definida como la cantidad máxima de coagulante capaz de lograr la mayor remoción de turbiedad sin comprometer la estabilidad del sistema

4.7.2 Análisis estadístico de resultados de la sexta prueba de jarras

Tabla 33

Dosis optima del coagulante e inflexión en la degradación de la turbiedad

Jarras Nro.	Dosis coagulante (mg/L)	Turbiedad inicial, τ (NTU)	Turbiedad final, τ (NTU)	Degradación de turbiedad
1	60	114	10,43	90,85%
2	70	114	9,75	91,45%
3	80	114	9,28	91,86%
4	90	114	8,39	92,64%
5	100	114	8,73	92,34%
6	110	114	9,03	92,08%

La tabla 33, muestra que la degradación de la turbiedad alcanza un 92,64 % en la jarra

4. Se observa una inflexión en la disminución de la turbiedad entre la jarra 4 y la jarra 5, lo que indica una reducción en la eficacia del proceso de coagulación y la aparición de la coagulación inversa. Este hallazgo es relevante, tanto desde el punto de vista práctico como económico, ya que representa la dosis óptima de coagulante que debería aplicarse al agua turbia de esta calidad, para lograr la máxima reducción de la turbiedad.

Tabla 34

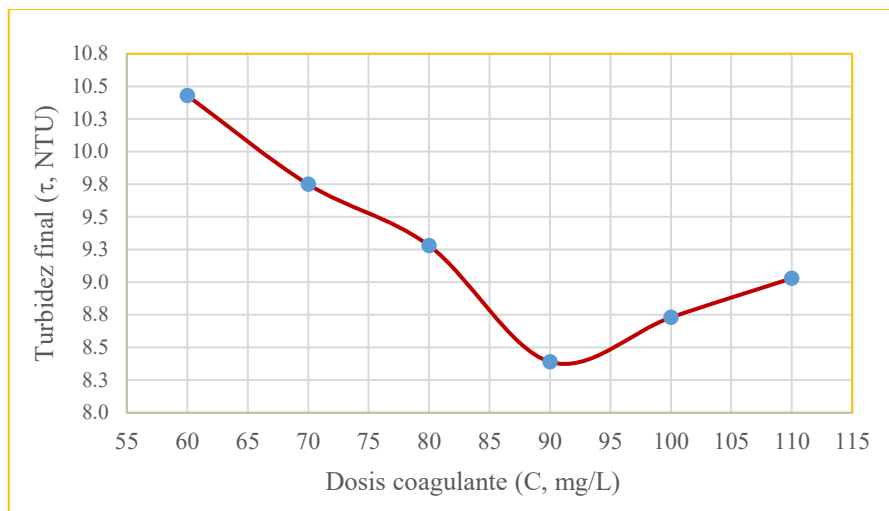
Degradación de la turbiedad y la dosis óptima del coagulante

Jarras Nro.	Dosis coagulante, (C, mg/L)	Turbiedad final, (τ , NTU)
1	60	10,43
2	70	9,75
3	80	9,28
4	90	8,39
5	100	8,73
6	110	9,03

La tabla 34, muestra con claridad que la inflexión en la degradación de la turbiedad se produce entre la jarra 4 y 5, pues la turbiedad final de 8,39 NTU pasa a 8,73 NTU respectivamente, por lo que la dosis óptima de coagulante debe encontrarse entre 90 y 100 mg/L.

Figura 28

Degradación de la turbiedad y dosis óptima del coagulante



De la figura 28, podemos inferir, que la dosis óptima de coagulante para esta prueba está entre 90 y 95 mg/L, dosis que permite la máxima degradación de la turbiedad, la misma que equivale al punto crítico del proceso, pues a partir de él, se produce la coagulación inversa. También se observa, que la curva es cóncava hacia arriba, con una única mínima, por lo que esta distribución se puede ajustar a un modelo logístico cuadrático.

4.7.3 Análisis y modelamiento de la data de la sexta prueba

Observando el comportamiento de la Turbiedad final, ($\hat{\tau}$, NTU) frente a la acción de la dosis del coagulante, (C, mg/L), que responde a una curva cóncavo hacia arriba y con una mínima única, de la forma:

$$\hat{\tau} = A + B \times C + D \times C^2$$

Realizando el ajuste pertinente, se llega a la expresión:

$$\hat{\tau} = 26.5486 - 0.3970 \times C + 0.002168 \times C^2$$

Para hallar la concentración crítica de la dosis del coagulante (C_c), se deriva la expresión anterior y se iguala a cero;

$$\frac{d\hat{\tau}}{dC} = -0.3970 + 2(0.002168) \times C$$

$$\frac{d\hat{\tau}}{dC} = 0$$

De tal manera que:

$$\frac{d\hat{\tau}}{dC} = -0.3970 + 2(0.002168) \times C = 0$$

De donde

$C_C = 91.5651$ mg/L, para la máxima degradación de la turbiedad y prácticamente coincide con lo medido.

Con esa información, se estima la turbiedad remanente:

$$\hat{\tau}_{(C_C=91.5691)} = 8.3741 \text{ NTU}$$

Con toda la información producida, se procede a estimar la turbiedad final, utilizando la ecuación cuadrática.

Tabla 35

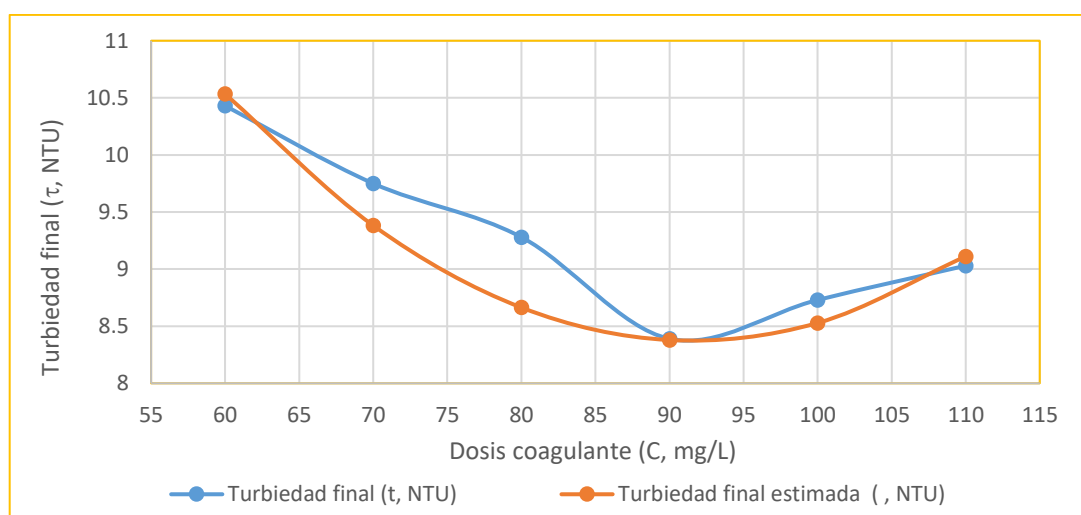
Turbiedad final medida, turbiedad final estimada y dosis del coagulante

Dosis coagulante (mg/L)	Turbiedad final medida τ (NTU)	Turbiedad final estimada, $\hat{\tau}$ (NTU)
60	10,43	10,5334
70	9,75	9,3818
80	9,28	8,6638
90	8,39	8,3794
100	8,73	8,5286
110	9,03	9,1114

La tabla 35, muestra una alta proximidad entre la data empírica de la turbiedad final y la turbiedad final estimada con el modelo cuadrático.

Figura 29

Turbiedad final medida y turbiedad final estimada



La Figura 29, presenta una alta concordancia entre los valores de turbiedad final medidos experimentalmente y aquellos estimados mediante el modelo cuadrático ajustado.

Esta correspondencia valida la capacidad predictiva del modelo para describir el comportamiento del proceso de coagulación bajo las condiciones evaluadas.

Ambas curvas - empírica y estimada - coinciden en señalar una dosis óptima de coagulante de 90 mg/L (90 ppm), correspondiente al punto de máxima eficiencia en la remoción de turbiedad. Este hallazgo refuerza la robustez del modelo como herramienta de apoyo para la toma de decisiones en procesos de tratamiento de agua con coagulantes naturales.

El coeficiente de correlación de Pearson ($R = 0,9626$) indica una asociación muy fuerte entre las variables, mientras que el coeficiente de determinación ($R^2 = 92,67\%$) muestra que cerca del 93% de la variación en los valores estimados de turbiedad puede ser explicada por la concentración del coagulante. Estos indicadores estadísticos confirman la idoneidad del modelo cuadrático y su utilidad práctica en la optimización del proceso, asegurando tanto la eficiencia técnica como la sostenibilidad del tratamiento.

4.7.4 Efecto de la degradación de la turbiedad en el pH

Tabla 36

Variación del pH con la degradación de la turbiedad

Dosis coagulante (mg/L)	pH (inicial)	pH (final)	Turbiedad final, (τ . NTU)
60	8,09	8,04	10,43
70	8,09	8,11	9,75
80	8,09	8,13	9,28
90	8,09	8,14	8,39
100	8,09	8,15	8,73
110	8,09	8,15	9,03

Se puede observar en la tabla 36, que luego de una ligera disminución de hasta 0,05 unidades en la primera jarra, este aumenta hasta en 0,06 unidades en las jarras 5 y 6, variación que se encuentra dentro de lo que se considera insignificante, que no afecta la calidad del agua ni es riesgo para salud ni el medio ambiente.

4.7.5 Efecto de la degradación de la turbiedad en la conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica del agua procesada, presenta una disminución en promedio aritmético de hasta 3,14%, que se explica como consecuencia del proceso de coagulación/floculación y sedimentación que neutralizan y precipitan los aniones presentes en el agua turbia, pero que no afecta la calidad del agua ni es riesgo para el ambiente.

V. Discusión de resultados

En el proceso de potabilización del agua, los métodos fisicoquímicos convencionales, como la coagulación, floculación y sedimentación, constituyen etapas clave para la remoción de sólidos suspendidos, conforme a lo señala Chulluncuy (2011) y Cabrera et al. (2020). Sin embargo, la creciente utilización de coagulantes químicos, particularmente el sulfato de aluminio (según la NTP 311.095), ha derivado en la generación de lodos residuales con contenido metálico potencialmente tóxico. Este subproducto representa un riesgo para el medio ambiente y la salud pública, además de implicar un aumento en los costos de disposición y tratamiento, tal como advierten Oliveira et al. (2021).

En este contexto, el presente estudio aporta evidencia relevante sobre el potencial de la harina de haba (*Vicia faba* L.) cruda, como coagulante natural en el tratamiento del agua, evidenciando una eficiencia en la reducción de la turbiedad que oscila entre el 89 % y más del 98 %, al aplicar concentraciones entre 60 y 92 mg/L. Este hallazgo posiciona a la harina de haba como una alternativa prometedora frente a los coagulantes químicos tradicionales, al no generar lodos tóxicos ni alterar significativamente parámetros fisicoquímicos esenciales como el pH o la conductividad eléctrica del agua tratada.

Los resultados obtenidos, son coherentes con los reportes de Bouaidi et al. (2022), quienes destacan el papel de los coagulantes naturales en la mejora de la calidad del agua y en la reducción de impactos ambientales negativos. A diferencia del sulfato de aluminio, los coagulantes de origen vegetal ofrecen ventajas adicionales en términos de biodegradabilidad,

disponibilidad local y bajo costo, elementos clave para su implementación en comunidades rurales o en contextos con recursos limitados.

Asimismo, el grado de turbiedad inicial observado en este estudio (436 NTU) es comparable con los niveles típicos de aguas residuales industriales, como las generadas por el sector textil (Cabrera et al., 2020), lo que refuerza la validez de los resultados y su aplicabilidad en escenarios de alta carga contaminante. En línea con lo señalado por Bratby (2016) y Talib y Musawi (2021), el uso de coagulantes naturales representa una estrategia sostenible y eficaz, que no solo contribuye a la protección del entorno, sino que también fortalece las políticas de salud pública mediante tecnologías apropiadas y de bajo impacto.

En resumen, la harina de haba cruda demuestra ser una solución viable, ecológica y eficaz para la reducción de la turbiedad del agua contaminada, consolidándose como una alternativa técnica con gran potencial para la implementación en procesos de tratamiento de agua potable, especialmente en zonas rurales y en desarrollo, como también lo sugieren Choy et al. (2014).

VI. Conclusiones

- 6.1. En concordancia con el problema de investigación, los objetivos propuestos y la hipótesis general, los resultados obtenidos a partir de los ensayos de coagulación-floculación utilizando solución al 1 % p/v de harina de haba cruda (*Vicia faba* L.), demuestran un alto potencial de esta sustancia como coagulante natural en el tratamiento de aguas turbias.
- 6.2. Los ensayos evidenciaron eficiencias significativas en la remoción de turbiedad, con reducciones superiores al 89 % y, en condiciones óptimas, valores mayores al 98 %, dependiendo de la turbiedad inicial y la dosis aplicada (60, 72 y 92 mg/L). Estos niveles de desempeño sitúan a la harina de haba en un rango comparable al de coagulantes naturales ampliamente estudiados, como moringa oleífera y polímeros derivados de taninos.
- 6.3. La harina de haba fue preparada a partir de semillas secas, descascaradas, molidas y tamizadas a 120 mesh (125 μ m). En solución acuosa, mostró un comportamiento coagulante eficiente, especialmente en aguas con turbiedades iniciales entre 419 y 455 NTU, donde una dosis de 72 mg/L logró reducciones de hasta 98,89 % y 97,86 %, respectivamente. En condiciones de turbiedad moderada, una dosis de 92 mg/L permitió obtener eficiencias de entre 89 % y 98,09 %, lo cual confirma su aplicabilidad en una amplia gama de calidades de agua.
- 6.4. En cuanto a la dosis óptima, se logró identificar un punto crítico a partir del cual el incremento en la concentración del coagulante no mejora la eficiencia, y puede incluso reducirla, fenómeno conocido como coagulación inversa. Se observó que la dosis óptima no es fija, sino que varía en función de la turbiedad inicial del agua, lo cual permite concluir que la dosificación debe ser ajustada según las

condiciones específicas del sistema. Este conocimiento resulta clave para optimizar el uso del coagulante, evitando tanto déficits como excesos, y maximizando su rendimiento técnico y económico.

6.5. Además de su eficacia operativa, el uso de harina de haba representa una alternativa ambientalmente sostenible y socialmente viable frente a coagulantes químicos convencionales como el sulfato de aluminio o el cloruro férrico. A diferencia de estos, el coagulante natural:

- No genera lodos metálicos tóxicos,
- No altera significativamente parámetros críticos como el pH o la conductividad eléctrica del agua tratada,
- Y puede ser producido y aplicado localmente, favoreciendo su implementación en contextos rurales o de bajos recursos.

6.6. En conjunto, estos hallazgos respaldan el uso de harina de haba como un coagulante natural eficaz, económico y sustentable, con potencial para contribuir a una gestión del agua más equitativa, resiliente y ecológica, especialmente en comunidades donde el acceso a tecnologías convencionales es limitado.

VII. Recomendaciones

En función de los hallazgos obtenidos, y con el propósito de ampliar el conocimiento sobre el uso de harina de haba (*Vicia faba* L.) como coagulante natural en el tratamiento de aguas turbias, se proponen las siguientes líneas de investigación y aplicación futura:

- 7.1. Ampliación del rango experimental:** Se recomienda realizar ensayos bajo diferentes niveles de turbiedad y composiciones químicas del agua, incluyendo aguas con variaciones en pH, alcalinidad, dureza y carga orgánica. Además, se sugiere incrementar el número de réplicas por tratamiento, a fin de fortalecer la validez estadística y reproducibilidad de los resultados.
- 7.2. Evaluación de sinergias entre coagulantes naturales:** Investigar la combinación de harina de haba con otros coagulantes naturales, como moringa oleífera, taninos vegetales o almidones modificados, para mejorar la eficiencia de remoción, reducir la dosis requerida y ampliar la aplicabilidad en diferentes matrices hídricas.
- 7.3. Aplicación a escala real:** Desarrollar estudios de viabilidad técnica, operativa y económica en plantas de tratamiento de agua potable (PTAP), especialmente en contextos rurales o comunidades con infraestructura limitada. Estos estudios deben considerar aspectos como: Suministro y disponibilidad de materia prima; costos de procesamiento y almacenamiento; manejo y disposición de lodos generados y adaptabilidad del sistema a tecnologías existentes.
- 7.4. Análisis del coagulante desengrasado:** Evaluar el comportamiento coagulante de harina de haba desengrasada, con el objetivo de determinar si la eliminación de lípidos contribuye a una mayor estabilidad, actividad o durabilidad del agente coagulante en solución.
- 7.5. Estudios comparativos con coagulantes químicos convencionales:** Realizar investigaciones comparativas controladas frente a coagulantes químicos tradicionales, como sulfato de aluminio o cloruro férrico, evaluando no solo la eficiencia en la remoción de turbidez, sino

también: Impactos ambientales (e.g., toxicidad del lodo, biodegradabilidad); riesgos sanitarios asociados a residuos químicos, costos económicos y externalidades del proceso.

7.6. Aplicabilidad en tratamiento de aguas residuales domésticas: Explorar la eficacia del coagulante natural en la remoción de turbidez, carga orgánica y sólidos suspendidos en aguas servidas domésticas. Esta línea de investigación es clave para valorar su potencial en sistemas descentralizados de saneamiento o en soluciones ecológicas de tratamiento de aguas residuales en zonas rurales.

7.7. Aplicación en efluentes industriales líquidos: Investigar el desempeño de la harina de haba como coagulante en el tratamiento de efluentes industriales complejos, tales como:

- Efluentes textiles (alto contenido colorante y tensioactivos),
- Agroindustriales (sólidos orgánicos y nutrientes),
- Mineros (altas cargas metálicas y pH extremos),
- Alimentarios (grasas y proteínas).

Validar su eficacia en estos contextos podría abrir nuevas posibilidades de aplicación, alineadas con principios de ecoeficiencia, biodegradabilidad y sostenibilidad ambiental

VIII. Referencias

- Abebe, L., Chen, X., & Sobsey, M. (2016). Coagulación de quitosano para mejorar la eliminación de microbios y turbidez mediante filtración cerámica de agua para el tratamiento de agua potable doméstica. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(3), 269.
<https://doi.org/10.3390/ijerph13030269>
- Adewole, S., Kuku, A., & Aderonke, O. (2020). Eficacia de una proteína coagulante natural procedente de semillas de *Moringa oleífera* (Lam) en el tratamiento del agua del embalse de Opa, Ile-Ife, Nigeria. *Heliyon*, 6(1), e03335.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03335>
- Aldana, E. (2012). *Uso del extracto de la semilla de Moringa oleífera como coagulante natural primario y ayudante de coagulación en el tratamiento de agua para consumo humano* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería].
- Álvarez, H. (2019). *Extracto de Moringa (Moringa oleífera) para la remoción de turbidez de efluentes de la producción de néctar de maracuyá* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional La Molina.
<https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3923>
- Andía, Y. (2000). *Tratamiento de agua: coagulación y floculación*. SEDAPAL, Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico.
https://www.academia.edu/40515416/Tratamiento_de_Agua_coagulaci%C3%B3n_y_floculaci%C3%B3n
- Baños, A. (2018). *Medición de la turbidez*. s. n.
- Baptista, A. T. A., Coldebella, P. F., Cardines, P. H. F., Gomes, R. G., Vieira, M. F., Bergamasco, R., & Vieira, A. M. S. (2015). Coagulation–flocculation process with ultrafiltered saline extract of *Moringa oleífera* for the treatment of surface water.

Chemical Engineering Journal, 276, 166–173.

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.04.045>

Barabasz, W., Albińska, D., Jaśkowska, M., & Lipiec, J. (2002). Ecotoxicology of aluminium.

Polish Journal of Environmental Studies, 11(3), 199–203.

<https://www.pjoes.com/Ecotoxicology-of-Aluminium,87442,0,2.html>

Barajas Garzón, C. L., & León Luque, A. J. (2015). *Determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$) en el proceso de coagulación-floculación para el tratamiento de agua potable por medio del uso de una red neuronal artificial* [Tesis de pregrado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio Institucional Universidad Santo Tomás.

<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2916/Barajasclaudia2015.pdf>

Barrenechea, A. (2008). *Tratamiento de agua para consumo humano: Coagulación*. Lima: OPS/CEPIS.

Bratby, J. (2016). *Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment* (3.^a ed.).

IWA Publishing. [https://iwaponline.com/ebooks/book/286/Coagulation-and-Flocculation-in-Water-and iwaponline.com](https://iwaponline.com/ebooks/book/286/Coagulation-and-Flocculation-in-Water-and-iwaponline.com)+1

Cabrera Bermúdez, X., Fleites Ramírez, M., & Contreras Moya, A. M. (2009). Estudio del proceso de coagulación-floculación de aguas residuales de la empresa textil “Desembarco del Granma” a escala de laboratorio. *Tecnología Química*, 29(3), 64–72.

<https://www.redalyc.org/pdf/4455/445543760009.pdf>

Camacho, F. P., Sousa, V. S., Bergamasco, R., & Ribau Teixeira, M. (2017). The use of *Moringa oleifera* as a natural coagulant in surface water treatment. *Chemical Engineering Journal*, 313, 226–237. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.12.031>

- Castrillón, D., & Giraldo, M. (2012). *Determinación de las dosis óptimas del coagulante sulfato de aluminio granulado tipo B en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de Tratamiento de Villa Santana* [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de Pereira].
- Charapaqui, J. (2023). *Acción coagulante de la tuna, tara, mashua en el tratamiento de aguas del río Ichu, Huancavelica 2020* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Vice-Rectorado de Investigación (VRIN).
<https://repositorio.unfv.edu.pe/bitstream/20.500.13084/7243/5/TESIS%20DOCTORADO%202023%20-%20UNFV%20-%20JUAN%20CHARAPAQUI%20ANCCASI%20%281%29.pdf>
- Choy, S. Y., Prasad, K. M. N., Wu, T. Y., & Ramanan, R. N. (2014). A review on commonly used natural coagulants. *Journal of Environmental Sciences*, 26(11), 2178–2189.
<https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.09.024>
- Chulluncuy-Camacho, N. C. (2011). Tratamiento de agua para consumo humano. *Ingeniería Industrial*, 29, 85–92. <https://doi.org/10.26439/ing.ind2011.n029.232>
- Dávila, C. M., Huamán, M. M., Flores, J. I., Polo, R. A., & Arguía, Y. F. (2018). Efectividad de especies naturales como ayudantes de coagulación para la clarificación de aguas turbias en épocas de avenidas en caseríos y centros poblados de Huaraz y Callejón de Huaylas. *Aporte Santiaguino*, 11(2), 299–310.
<https://doi.org/10.32911/as.2018.v11.n2.583>
- El Bouaidi, W., Libralato, G., Tazart, Z., Enaïme, G., Douma, M., Ounas, A., Yaacoubi, A., Lofrano, G., Carotenuto, M., Saviano, L., Siciliano, A., Romano Spica, V., Guida, M., & Loudiki, M. (2022). Nature-based coagulants for drinking water treatment: An ecotoxicological overview. *Water Environment Research*, 94(8), e10782.

<https://doi.org/10.1002/wer.10782>

Feria, J., Bermúdez, S., & Estrada, A. (2014). Eficiencia de la semilla *Moringa oleífera* como coagulante natural para la remoción de la turbidez del río Sinú. *Producción + Limpia*, 9(1), 9–22. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552014000100001&lng=en&tlng=es

Ferreira, V., Silva, I., Lopez, A., Ornaghi, D., & Mambeli, R. (2018). Clarification of high-turbidity waters: A comparison of *Moringa oleífera* virgin and recovered aluminum sulfate-based coagulants. *Environment, Development and Sustainability*, 1, 1–12. <http://doi.org/xxxx>

García, M., & Pérez, R. (2004). Aplicación de coagulantes naturales en el tratamiento de aguas: revisión de experiencias y perspectivas. *Higiene y Sanidad Ambiental*, 4, 72–82. [https://saludpublica.ugr.es/sites/dpto/spublica/public/inline-files/bc510156890491c_Hig.Sanid_Ambient.4.72-82\(2004\).pdf](https://saludpublica.ugr.es/sites/dpto/spublica/public/inline-files/bc510156890491c_Hig.Sanid_Ambient.4.72-82(2004).pdf)

Gómez Gutiérrez, K. R. (2010, diciembre). *Eficiencia del coagulante de la semilla de Moringa oleífera en el tratamiento de agua con baja turbidez* [Proyecto especial de grado, Universidad Zamorano]. Zamorano.

[https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=G%C3%B3mez%2C+K.%2C+Eficiencia+del+coagulante+de+la+semilla+de+Moringa+oleifera+en+el+tratamiento]

Gómez Gutiérrez, K. R. (2010, diciembre). *Eficiencia del coagulante de la semilla de Moringa oleífera en el tratamiento de agua con baja turbidez*. [Proyecto especial de grado, Universidad Zamorano]. Zamorano.

https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=G%C3%B3mez%2C+K.%2C+Eficiencia+del+coagulante+de+la+semilla+de+Moringa+oleifera+en+el+tratamiento

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2020). *Metodología de la investigación*. McGraw Hill Education.

Instituto Nacional de Calidad [INACAL]. (s. f.). *Norma Técnica Peruana NTP 311.095. Sulfato de aluminio ($Al_2SO_4 \cdot 18H_2O$) para tratamiento de agua de consumo humano: Requisitos químicos y físicos*. <https://es.scribd.com/document/381656404/Ntp-311-095-1999-Sulfato-de-Aluminio-Tratamiento-de-Agua-de-Agua-Requititos>

Instituto Nacional de Calidad [INACAL]. (2014). *Norma Técnica Peruana NTP 214.003. Requisitos para la calidad del agua potable*. <https://es.scribd.com/document/717978153/32981-NTP-214-003-revisada-el-2021-CALIDAD-AGUA-POTABLE-2>

Kelderman, P., & Kruis, G. (2001). *Curso de laboratorio: Química acuática y sus aplicaciones en ingeniería ambiental*. Instituto Internacional de Ingeniería de Infraestructura, Hidráulica y Ambiental.

Kiely, G., & Veza, J. M. (1999). *Ingeniería ambiental: Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. McGraw-Hill Interamericana de España. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=235126>

Krupińska, I. (2020). Aluminium drinking water treatment residuals and their toxic impact on human health. *Molecules*, 25(3), 641. <https://doi.org/10.3390/molecules25030641>

Kyncl, M., (2012). Valorization of undervalued aluminum-based waterworks sludge waste for the science of “The 5 Rs’ criteria”. <https://www.mdpi.com/1420-3049/25/3/641>

- Lorenzo-Acosta, Y. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 40(2), 10–17.
<https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120664002.pdf>
- Maldonado, V. (2008). *Tratamiento de agua para consumo humano: Sedimentación*. OPS/CEPIS. <https://www.cepis.ops-oms.org>
- Montgomery, D. C. (2008). *Diseño y análisis de experimentos* (6.^a ed.). Limusa Wiley.
- Montoya, C., Loaiza, D., Torres, P., Cruz, C., & Escobar, J. (2011). Efecto del incremento en la turbiedad del agua cruda sobre la eficiencia de procesos convencionales de potabilización. *Revista EIA*, 16(1), 137–148.
- Marcó, L., Azario, R., Metzler, C., & García, M. del C. (2004). La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizables a partir de fuentes superficiales: Propuestas a propósito del estudio del sistema de potabilización y distribución en la ciudad de Concepción del Uruguay (Entre Ríos, Argentina). *Higiene y Sanidad Ambiental*, 4, 72–82.
[https://saludpublica.ugr.es/sites/dpto/spublica/public/inline-files/bc510156890491c_Hig.Sanid_Ambient.4.72-82\(2004\).pdf](https://saludpublica.ugr.es/sites/dpto/spublica/public/inline-files/bc510156890491c_Hig.Sanid_Ambient.4.72-82(2004).pdf)
- Moreira Limongi, J., & Moreira Mendoza, C. (2022). Aplicación de coagulantes naturales obtenidos de las semillas de habas (*Vicia faba*) y durazno (*Prunus persica*) en la potabilización del agua. *Revista Colón Ciencias, Tecnología y Negocios*, 1(1), 1–15.
<https://portal.amelica.org/ameli/journal/215/2152932006/>
- Okuda, T., Baes, A. U., Nishijima, W., & Okada, M. (2020). Coagulation mechanism of salt solution-extracted active component in *Moringa oleifera* seeds. *Molecules*, 25(3), 641.
<https://doi.org/10.3390/molecules25030641>
- Oliveira, F., Teixeira, R., & Oliveira, C. (2021). Eficacia de dos polímeros naturales a base de taninos en contraste con el sulfato de aluminio para la producción de agua potable. *Ingeniería y Tecnología más Limpias*, 3(1), 1–10.

- Organización Mundial de la Salud. (2011). *Guías para la calidad del agua potable* (4.^a ed.). <https://www.who.int/es/publications/i/item/9789241549950>
- Pérez de la Cruz, F. J., & Urrea, M. A. (s. f.). *Tema 6: Coagulación y floculación* [Presentación en PowerPoint]. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Plaza-Díaz, J., Martínez, O., & Gil, Á. (2013). Los alimentos como fuente de mono y disacáridos: Aspectos bioquímicos y metabólicos. *Nutrición Hospitalaria*, 28(Supl. 4), 72–82. https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0212-16112013001000002
- Rodríguez-Jiménez, D. M., & Gallego-Suárez, D. J. (2019). Evaluación del quitosano como coagulante para el tratamiento de efluentes piscícolas. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 21(1), 6–17. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v21n1.73340>
- Snoeyink, V. L., & Jenkins, D. (1987). *Química del agua*. Limusa.
- Solís, R., Laines, J. R., & Hernández, J. R. (2012). Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(3), 205–214. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992012000300005
- Suay, L., & Ballester, F. (2002). Revisión de los estudios sobre exposición al aluminio y enfermedad de Alzheimer. *Revista Española de Salud Pública*, 76(6), 687–700. https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1135-57272002000600002
- Taiwo, A., Adenike, K., & Aderonke, O. (s. f.). Eficacia de una proteína coagulante natural de semillas de *Moringa oleífera* (Lam) en el tratamiento del agua del embalse de Opa, Ile-Ife, Nigeria.
- Talib, A., & Musawi, N. (2021). Water treatment with conventional and alternative coagulants: A review. *Journal of Engineering*, 27(9), 20–28.

- Tarón-Dunoyer, A. A., Guzmán-Carrillo, L. E., & Barros-Portnoy, I. (2017). Evaluación de la *Cassia fistula* como coagulante natural en el tratamiento primario de aguas residuales. *Orinoquia*, 21(1), 73–78. <http://www.scielo.org.co/pdf/rori/v21n1/0121-3709-rori-21-01-00073.pdf>
- Teixeira, R., & Oliveira, C. (2021). Eficacia de dos polímeros naturales a base de taninos en contraste con el sulfato de aluminio para la producción de agua potable. *Ingeniería y Tecnología más Limpias*, 3(1), 1–10.
- Tony, M. A. (2022). Valorization of undervalued aluminum-based waterworks sludge waste for the science of “The 5 Rs’ criteria”. *Applied Water Science*, 12, 20. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01554-7>
- Torrellas, R. (2012). La exposición al aluminio y su relación con el ambiente y la salud. *Tecnogestión: Una Mirada al Ambiente*, 9(1). <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/tecges/article/view/5646>
- Vaquero, M. P., & Toxqui, L. (2012). *Agua para la salud, pasado, presente y futuro*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (España). <http://hdl.handle.net/10261/90103>
- Vargas, M., & Romero, L. G. (2006). Aprovechamiento de algunos materiales en el desarrollo de coagulantes y floculantes para el tratamiento de aguas en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 19(4), 1–10.
- Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero, C., Vargas-Hernández, J. J., & López-Upton, J. (2006). Variación entre procedencias de *Pinus pseudostrobus* establecidas en dos sitios en Michoacán, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29(2), 121–126. <https://www.redalyc.org/pdf/610/61029204.pdf>
- Yang, Z. L., Gao, B. Y., Yue, Q. Y., & Wang, Y. (2010). Effect of pH on the coagulation performance of Al-based coagulants and residual aluminum speciation during the

treatment of humic acid–kaolin synthetic water. *Journal of Hazardous Materials*, 178(1–3), 596–603. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.01.127>

IX. Anexos

Anexo A.

Cartilla informativa del haba INIA 409 Munay Angelica

[illegible]

Nota: Reproducida de cartilla física de INIA CUSCO-MIDAGRI. Esta nueva variedad de haba se conoce como “Munay Angelica”. Se caracteriza por tener un alto contenido de carbohidratos y ha sido utilizado como materia prima para este trabajo.

Anexo B:***Método de Nefelometría (medición de la turbiedad del agua)***

La turbiedad del agua se mide utilizando el método conocido como el “Método de nefelometría”, el más utilizado y recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA).

Método de Nefelometría

1. Principio: Este método se basa en la dispersión de la luz. Cuando un haz de luz pasa a través de una muestra de agua, las partículas suspendidas en el agua dispersan esa luz. La cantidad de luz dispersada se relaciona con la concentración de partículas en el agua.
2. Instrumento: Se utiliza un nefelómetro, que mide la cantidad de luz que se dispersa en un ángulo específico. La turbiedad se expresa típicamente en unidades de NTU (Nephelometric Turbidity Units).
3. Procedimiento: La muestra de agua se coloca en un recipiente específico y se ilumina con una fuente de luz. Un detector mide la cantidad de luz dispersada y esta medición se convierte en un valor que indica la turbiedad.
4. Normativas:
 - OMS: Recomendación que el agua potable tenga una turbiedad menor a 5 NTU, aunque idealmente debería ser inferior a 1 NTU para asegurar la calidad del agua.
 - EPA: Establece un límite de turbiedad de 1 NTU para el agua potable en sistemas de distribución.
5. Consideraciones

Es importante realizar las mediciones de turbiedad de manera regular, ya que la turbiedad puede ser un indicador de la presencia de microorganismos patógenos, así como de contaminantes químicos.

Anexo C.

Método del Potenciómetro o medidor del potencial de hidrógeno (pH)

La Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) utilizan métodos estandarizados para medir el pH del agua. El método más utilizado es el uso de un potenciómetro o medidor de pH. Este instrumento mide la concentración de iones de hidrógeno en una muestra de agua, lo que permite determinar su nivel de acidez o alcalinidad.

El procedimiento típico incluye los siguientes pasos:

1. Calibración del medidor: Previo a la medición, el medidor de pH se calibra con soluciones estándar de pH conocido para asegurar la precisión.
2. Toma de muestra: Se toma una muestra del agua cruda y del agua procesada, asegurándose que esté libre de contaminantes que pudieran afectar la medición.
3. Medición: Se sumerge el electrodo del medidor de pH en la muestra de agua. El dispositivo proporciona una lectura directa del pH.
4. Registro de datos: Se registran los valores obtenidos en tabla de resultados para su análisis y comparación.

Es importante seguir las directrices específicas de la OMS y la EPA en cuanto a la frecuencia de calibración del equipo.

Anexo D.

Método de conductometría o medición de la conductividad eléctrica del agua.

Está relacionada con la cantidad de iones disueltos en el agua y proporciona información sobre su calidad y salinidad. La OMS ni la EPA han proporcionan límites específicos para la conductividad eléctrica, sin embargo, se utiliza como un indicador general de la calidad del agua.

- Instrumentación / materiales y medición
 - Conductímetro y vasos precipitados.
 - Se mide en microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$).
- Reactivos: Solución de KCl 0,01 N.
- Preparación de reactivos
 - Solución de KCl 0,01 N.
 - a. Pesar 0.745 g de Cloruro de Potasio.
 - b. Aforar a un litro.
- **Procedimiento**
 - Ajuste instrumental de acuerdo al manual de operaciones del equipo.
 - Calibración del Conductímetro utilizando la solución de KCl 0.01N.
 - Llevar las muestras al instrumento y efectuar las mediciones
 - Retomar los controles a la posición "cero" o de reposo.
- **Recomendaciones**

Las medidas de conductividad requieren ser hechas de inmediato, al llegar la muestra al laboratorio. El tiempo y la temperatura hacen variar los resultados.

Este método, es parte de los estándares establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) en su publicación "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater".

Anexo E.

Tabla para el registro de la data inicial de propiedades físico-químicas, condiciones operativas y registro de propiedades físico-químicas finales (Agua turbia del río Tenerías- San Sebastián – Cusco)

Solución coagulante madre: 1% p/v Temperatura ambiental:.....

Variables / Jarras	1	2	3	4	5	6
Turbidez inicial (t, NTU)						
pH inicial						
Conductividad inicial ($\mu\text{S}/\text{cm}$)						
Dosis coagulante (C, mg/L)						
Volumen coagulante (mL)						
Mezcla rápida (rpm)	150	150	150	150	150	150
Tiempo mezcla rápida (s)	10	10	10	10	10	10
Mezcla lenta (rpm)	20	20	20	20	20	20
Tiempo mezcla lenta (min)	20	20	20	20	20	20
Tiempo sedimentación (min)	30	30	30	30	30	30
Turbidez final (t, NTU)						
pH (final)						
Conductividad eléctrica final ($\mu\text{S}/\text{cm}$)						

La tabla del anexo 5, fue diseñado y utilizado como la herramienta para recopilar las propiedades físico químicas iniciales y finales del agua tratada. Se tabula los siguientes datos:

1. La variable dependiente (turbiedad), variables independientes (concentración y volumen de la solución coagulante, pH y conductividad eléctrica)
2. Velocidad y tiempo de la mezcla rápida (coagulación) y mezcla lenta (floculación), y el tiempo de sedimentación.