



La investigación, su esencia y arte.

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL Y AMBIENTAL

TESIS

**EVALUACIÓN DEL USO DE BENTONITA Y *Opuntia ficus-indica* COMO
COAGULANTE-FLOCULANTE PARA EL TRATAMIENTO EN AGUAS CRUDAS,
PAMPAS-2024**

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Forestal y Ambiental

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

L12: SEGURIDAD AMBIENTAL Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE:

AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO

CAMPO DE LA INVESTIGACIÓN Y EL DESARROLLO OCDE:

1.00.00 -- Ciencias Naturales

PRESENTADO POR:

Bach. GLORIA MARIA LOPEZ YUPANQUI

(ORCID: 0000-0002-4945-7189)

Bach. JACK BRANDO PEREZ HIJAR

(ORCID: 0000-0002-7907-6934)

ASESOR:

Dr. ADIEL ALVAREZ TICLLASUCA

(ORCID: 0000-0002-5410-0571)

Pampas - Perú

2025

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS EN LA MODALIDAD PRESENCIAL
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO FORESTAL Y AMBIENTAL**

Expediente N° 10-2025-UNAT/FI-EPIFA

Página 1 de 1

En esta acta, se hace constar que en el auditorium de la Escuela Profesional de Ingeniería en Civil de la Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo, ubicado en el distrito de Ahuaycha, provincia de Tayacaja, departamento Huancavelica, el día **04 de setiembre del 2025**, a las **10:00** horas, se reunieron los miembros del Jurado Calificador designados con Resolución de Coordinación N° 26-2024-UNAT/FI de 22 de agosto del 2024, con el propósito de llevar a cabo el **Acto de Sustentación** de la Tesis de Titulación Profesional:

"EVALUACIÓN DEL USO DE BENTONITA Y *Opuntia ficus-indica* COMO COAGULANTE-FLOCULANTE PARA EL TRATAMIENTO EN AGUAS CRUDAS, PAMPAS-2024"

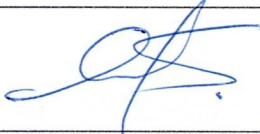


Dicha tesis ha sido presentada por los Bachilleres en Ingeniería Forestal y Ambiental **LOPEZ YUPANQUI GLORIA MARIA** y **PEREZ HIJAR JACK BRANDO**, asesorados por el docente **Dr. ÁLVAREZ TICLLASUCA ADIEL** adscrito al Departamento Académico de Forestal y Ambiental.

Después de haber calificado el informe final de tesis, escuchada la sustentación y las respuestas a las preguntas formuladas por el Jurado, se le declara¹: Aprobado, para optar el **Título Profesional de INGENIERO FORESTAL Y AMBIENTAL**, con la calificación de 18,3, que corresponde a la condición²: muy bueno.

En consecuencia, el sustentante:

- Queda en condición de recibir el indicado Título Profesional, de conformidad con las normas legales, estatutarias y reglamentarias aplicables en materia del proceso de titulación profesional.
- NO queda en condición de recibir el indicado Título Profesional, de conformidad con las normas legales, estatutarias y reglamentarias aplicables en materia del proceso de titulación profesional.

Siendo las 11:07 horas del mismo día, mes y año, se da por concluido el Acto de Sustentación, firmando a continuación los intervinientes, en señal de conformidad de lo acontecido y consignado.

	
Dra. LAVADO MEZA CARMENCITA DEL ROCIO Presidente	Mg. ORTECHO LLANOS RONALD Miembro
	
Dr. ÁLVAREZ TICLLASUCA ADIEL Asesor	

1. Indicar: Aprobado y/o Desaprobado.
2. Indicar: Excelente, Muy Bueno, Bueno, Regular y/o Desaprobado.

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD N° 045-2025

EL DIRECTOR DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE TAYACAJA DANIEL HERNÁNDEZ MORILLO, QUIEN SUSCRIBE:

HACE CONSTAR:

Que, la tesis titulada: "EVALUACIÓN DEL USO DE BENTONITA Y *Opuntia ficus-indica* COMO COAGULANTE-FLOCULANTE PARA EL TRATAMIENTO EN AGUAS CRUDAS, PAMPAS-2024", desarrollado por los bachilleres de la Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental **Lopez Yupanqui Gloria Maria** y **Perez Hajar Jack Brando**, asesorados por el **Dr. Álvarez Ticllasuca Adiel**, cumple con los requisitos de conformidad de originalidad mediante (*software Anti Plagio Turnitin*), evidenciándose en el informe de originalidad un porcentaje de similitud de diecinueve (19%), el cual se encuentra dentro del parámetro establecido por la Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo.

Se expide la presente constancia para los fines que estime conveniente.

Pampas, 10 de setiembre de 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE TAYACAJA
"DANIEL HERNÁNDEZ MORILLO"

.....
Dr. Silvio Raúl Vriotto Rosales
DIRECTOR DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Constancia: N°045-2025.
Cc. Archivo.

Agradecimiento

Agradezco en primer lugar a Dios por otorgarme la fortaleza, sabiduría y salud para culminar esta importante etapa de mi vida. Su guía y protección han sido fundamentales para alcanzar este logro.

A mis padres, por su amor incondicional, apoyo constante y por enseñarme con su ejemplo el valor del esfuerzo y la perseverancia, gracias por confiar en mí, incluso en los momentos más difíciles y por ayudarme a superar cada obstáculo. A mi hermano, por su compañía, palabras de aliento y paciencia a lo largo de este camino. A esa persona especial, por su amor y apoyo incondicional, cuya presencia ha sido fundamental en cada paso de este camino.

Por último, expreso mi más sincero agradecimiento a todos los docentes de la facultad por su valiosa enseñanza. En especial, al Dr. Adiel Álvarez Ticllasuca, mi asesor, por su dedicación, orientación y sabios consejos, los cuales han sido clave para el desarrollo y éxito de esta tesis.

(Gloria Maria Lopez Yupanqui)

Agradezco a Dios por darme la fortaleza, la perseverancia y por guiar mi vida con sabiduría para alcanzar este logro.

A mis padres, por su amor incondicional, apoyo constante, confianza y por creer siempre en mí. A mis papitos, por estar siempre presentes, guiándome con sus palabras y su fe en mí. A mi tío, tías y primos, por recordarme que no basta con ser un buen profesional, sino también una buena persona; sus palabras de aliento fueron clave para llegar hasta aquí.

Finalmente, expreso mi profundo agradecimiento a todos los docentes que me acompañaron a lo largo de la carrera, por sus enseñanzas y consejos. En especial, al Dr. Adiel Álvarez Ticllasuca, mi asesor, por su dedicación y perseverancia, cualidades que fueron clave para el desarrollo y éxito de esta tesis.

(Jack Brando Perez Hajar)

Dedicatoria

Dedico esta tesis a mis padres, Gloria y Sandro, quienes fueron y siguen siendo mi más grande inspiración para luchar día a día, desde el principio estuvieron ahí porque siempre creyeron en mí, nunca me cansaré de agradecer todo lo que hacen por mí.

A mi hermano Luis, compañero de vida y aventuras, con quien comparto no solo la sangre, sino también los sueños, las risas y el apoyo mutuo. A esa persona especial, confidente de mis anhelos, por acompañarme en cada paso del camino, por animarme siempre a seguir adelante y por ser los brazos que me brindan seguridad. Y a mis fieles compañeros de cuatro patas, Logan y Gringo, por su amor puro, su compañía silenciosa pero poderosa, y por recordarme cada día que la felicidad está en las cosas simples.

A ustedes, que son mi todo, les dedico este logro de corazón, esta meta también es suya, porque en cada paso estuvieron conmigo.

(Gloria Maria Lopez Yupanqui)

Dedico este logro a mi mamá Yaqui y a mi papá Eliseo, por confiar en mí y por su apoyo incondicional. Agradezco a mi familia

A mi querido papito Don Hernán, gracias por tu amor, tu ejemplo y tu compañía incondicional y ejemplo a seguir.

A mi hermano Hernán, por tu aprecio sincero y tu apoyo en los momentos más importantes. A mis primos Yond y Marlon, en especial a Yond, que más que un primo, es un verdadero hermano por sus consejos, tu sabiduría y por estar siempre allí cuando más te necesité. A mi mamá China y papa Yond, por tu respaldo, tu cariño constante y por compartir conmigo este camino.

Y a ti, mi querida mamita Ushe, que, aunque ya no estés físicamente, vives en mi corazón. Fuiste y siempre serás una madre para mí, ejemplo de amor, sacrificio y fortaleza, donde tu recuerdo me acompaña, tus valores me guían, y tu amor sigue dándome fuerza. Desde el cielo sigues iluminando mi camino. Este logro también es tuyo. Gracias por todo lo que significaste en mi vida.

(Jack Brando Perez Hajar)

Índice

Agradecimiento.....	ii
Dedicatoria.....	iii
Índice.....	iv
Índice de tablas.....	viii
Índice de figuras.....	x
Resumen.....	xii
Abstract.....	xiii
I. Introducción.....	14
1.1. Planteamiento del problema.....	16
1.2. Formulación del problema.....	17
1.2.1. Problema general.....	17
1.2.2. Problemas específicos.....	17
1.3. Justificación.....	18
1.3.1. Justificación ambiental.....	18
1.3.2. Justificación social.....	19
1.3.3. Justificación económica.....	21
1.4. Objetivos.....	22
1.4.1. Objetivo general.....	22
1.4.2. Objetivos específicos.....	22
1.5. Formulación de hipótesis.....	22
1.5.1. Hipótesis general.....	22
1.5.2. Hipótesis específicas.....	22
II. Marco teórico.....	23
2.1. Antecedentes.....	23
2.1.1. Internacionales.....	23
2.1.2. Nacionales.....	27

2.1.3. Local.....	30
2.2. Bases teóricas y conceptuales	31
2.2.1. Teoría de la coagulación del agua.....	31
2.2.2. Teoría de la floculación.....	35
2.2.3. Teoría de la sedimentación.....	36
2.2.4. Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano	36
2.3. Bases Conceptuales.....	38
2.3.1. Calidad del agua.....	38
2.3.2. <i>Opuntia ficus-indica</i>	40
2.3.3. Bentonita	43
2.3.4. Prueba de Jarras.....	43
III. Metodología.....	45
3.1. Tipo de investigación	45
3.2. Nivel de investigación.....	45
3.3. Método de investigación	45
3.3.1. Materiales	45
3.3.2. Monitoreo de muestras de agua.....	46
3.3.3. Obtención del floculante <i>Opuntia ficus-indica</i>	48
3.3.4. Obtención de la bentonita como coagulante	48
3.3.5. Tratamiento del agua cruda	49
3.4. Diseño de investigación	50
3.5. Población, muestra y muestreo	52
3.5.1. Población.....	52
3.5.2. Muestra.....	53
3.6. Identificación y operacionalización de variables	53
3.6.1. Variable independiente.....	53
3.6.2. Variable dependiente.....	53

3.6.3.	Operacionalización de variables	53
3.7.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	55
3.7.1.	Instrumentos de recolección de datos	55
3.8.	Técnicas de procesamiento y análisis de datos	56
3.8.1.	Técnicas de análisis de datos.....	56
3.8.2.	Procesamiento de análisis de datos	56
3.8.3.	Aspectos éticos y regulatorios.....	57
IV.	Resultados.....	59
4.1.	Caracterización de las aguas crudas.....	59
4.2.	Resultados del tratamiento de agua en alta turbiedad	60
4.2.1.	Promedio de resultados del tratamiento del agua en alta turbiedad	62
4.2.2.	Porcentaje de remoción de turbiedad y SST en alta turbiedad.....	68
4.3.	Resultados del tratamiento de agua en baja turbiedad	72
4.3.1.	Promedio de resultados del tratamiento del agua en baja turbiedad	74
4.3.2.	Porcentaje de remoción de turbiedad y SST	81
4.4.	Efecto de las variables de estudio en el tratamiento de aguas mediante coagulación-floculación.....	86
4.4.1.	Efecto de las variables en la remoción de turbiedad	86
4.4.2.	Efecto de las variables en la remoción de SST	90
4.5.	Comparación de resultados en alta turbiedad y baja turbiedad.....	92
4.6.	Contrastación de hipótesis de la investigación	94
4.6.1.	Remoción de turbiedad y SST a alta turbiedad.....	95
4.6.2.	Remoción de turbiedad y SST a baja turbiedad	101
4.6.3.	T-student para comparación entre alta y baja turbiedad	108
V.	Discusión	111
5.1.	Efecto de la dosis de bentonita y <i>Opuntia ficus-indica</i> como coagulante y floculante sobre la remoción de la turbiedad	111

5.2. Efecto combinado y la relación química entre bentonita y <i>Opuntia ficus-indica</i> en procesos de coagulación-floculación	116
5.3. Efecto de la dosis de la bentonita y <i>Opuntia ficus-indica</i> sobre los parámetros fisicoquímicos pH, temperatura y conductividad	119
VI. Conclusiones.....	121
VII. Recomendaciones	122
VIII. Referencias bibliográficas	123
IX. Anexo	131
Anexo A: Monitoreo de las aguas crudas	131
Anexo B: Obtención del floculante de <i>Opuntia ficus-indica</i>	132
Anexo C: Preparación del coagulante de bentonita.....	133
Anexo D: Tratamiento de las aguas crudas	134
Anexo E. Reportes de laboratorio	139

Índice de tablas

Tabla 1. Límites Máximos Permisibles de Parámetros de Calidad Organoléptica.....	37
Tabla 2. Límites Máximos Permisibles de Parámetros Microbiológicos y Parasitológicos....	38
Tabla 3. Taxonomía de la penca de la tuna (<i>Opuntia ficus-indica</i>)	40
Tabla 4. Niveles de las variables de estudio	51
Tabla 5. Diseño factorial 4×4.....	51
Tabla 6. Operacionalización de variables	54
Tabla 7. Parámetros iniciales del agua cruda del rio Viñas	59
Tabla 8. Resultados del tratamiento mediante coagulación-floculación de aguas en..... alta turbiedad.....	61
Tabla 9. Resultados promedio de las aguas tratadas pro coagulación-floculación.....	63
Tabla 10. Porcentaje de remoción de turbiedad y SST en alta turbiedad	69
Tabla 11. Resultados del tratamiento de agua en baja turbiedad mediante	72
coagulación-floculación.....	72
Tabla 12. Resultado promedio del tratamiento de agua en baja turbiedad mediante	74
coagulación-floculación.....	74
Tabla 13. Porcentaje de remoción de turbiedad y SST en baja turbiedad	82
Tabla 14. Mejores resultados en alta turbiedad y baja turbiedad.....	93
Tabla 15. Resumen del modelo de turbiedad (alta turbiedad)	96
Tabla 16. Análisis de varianza de la turbiedad (alta turbiedad).....	97
Tabla 17. Resumen del modelo de SST (alta turbiedad)	98
Tabla 18. Estadística descriptiva de la dosis de <i>Opuntia ficus-indica</i> (alta turbiedad)	99
Tabla 19. Kruskal-Wallis de dosis de la dosis de <i>Opuntia ficus-indica</i> (alta turbiedad).....	99
Tabla 20. Estadística descriptiva dosis de bentonita (alta turbiedad)	100
Tabla 21. Kruskal-Wallis de dosis de la dosis de bentonita (alta turbiedad).....	100

Tabla 22. Resumen del modelo de turbiedad (baja turbiedad)	102
Tabla 23. Análisis de varianza de la turbiedad (alta turbiedad).....	103
Tabla 24. Resumen del modelo de SST (baja turbiedad).....	105
Tabla 25. Estadística descriptiva de la dosis de <i>Opuntia ficus-indica</i> (baja turbiedad)	106
Tabla 26. Kruskal-Wallis de dosis de la dosis de <i>Opuntia ficus-indica</i> (baja turbiedad).....	106
Tabla 27. Estadística descriptiva dosis de bentonita (baja turbiedad)	107
Tabla 28. Kruskal-Wallis de dosis de la dosis de bentonita (baja turbiedad)	107
Tabla 29. Estadísticos descriptivos en la remoción de turbiedad	108
Tabla 30. Prueba de t-student para remoción de turbiedad.....	108
Tabla 31. Estadísticos descriptivos en la remoción de SST.....	109
Tabla 32. Prueba de t-student para remoción de SST	109

Índice de figuras

Figura 1 Fuerza de atracción y repulsión	33
Figura 2 Atrapamiento de partículas en un flóculo.....	34
Figura 3 Efecto de puente de partículas en suspensión.....	35
Figura 4 Fotografías seleccionadas del proceso de extracción del mucílago de las cáscaras..... del fruto de <i>Opuntia ficus - indica</i>	42
Figura 5 Mapa de ubicación de la toma de muestra de agua cruda de la PTAP.....	47
Figura 6 Planta de tratamiento de agua potable (PTAP).....	52
Figura 7 pH final después del tratamiento en alta turbiedad	65
Figura 8 Temperatura final después del tratamiento en alta turbiedad.....	66
Figura 9 Turbiedad final después del tratamiento en alta turbiedad.....	66
Figura 10 SST final después del tratamiento mediante coagulación-floculación.....	67
Figura 11 Porcentaje de remoción de turbiedad – alta turbiedad.....	70
Figura 12 Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales – alta turbiedad	71
Figura 13 pH final después del tratamiento en baja turbiedad.....	76
Figura 14 Temperatura final después del tratamiento en baja turbiedad.....	77
Figura 15 Conductividad final después del tratamiento en baja turbiedad.....	78
Figura 16 Turbiedad final después del tratamiento en baja turbiedad.....	79
Figura 17 SST final después del tratamiento en baja turbiedad.....	80
Figura 18 Porcentaje de remoción de turbiedad - baja turbiedad	83
Figura 19 Porcentaje de remoción de SST – baja turbiedad.....	84
Figura 20 Efectos principales en la remoción de turbiedad (alta turbiedad)	86
Figura 21 Interacción de variables en la remoción de turbiedad (alta turbiedad).....	87
Figura 22 Efectos principales en la remoción de turbiedad (baja turbiedad)	88
Figura 23 Interacción de variables en la remoción de turbiedad (baja turbiedad).....	89

Figura 24 Efectos principales en la remoción de SST	90
Figura 25 Interacción de variables en la remoción de SST	91
Figura 26 Remoción de turbiedad en baja turbiedad y alta turbiedad	94
Figura 27 Gráfica de probabilidad normal para la remoción de turbiedad (alta turbiedad) ...	95
Figura 28 Gráfica de probabilidad normal para la remoción de SST	98
Figura 29 Gráfica de probabilidad normal para la remoción de turbiedad (baja turbiedad).	101
Figura 30 Gráfica de probabilidad normal para la remoción de SST (baja turbiedad).....	104
Figura 31 Identificación del punto de monitoreo.....	131
Figura 32 Toma de parámetros de campo	131
Figura 33 Toma de muestra para análisis inicial y corridas experimentales	132
Figura 34 Pesado y cortado de la <i>Opuntia ficus-indica</i>	132
Figura 35 Preparación para la extracción del floculante.....	133
Figura 36 Pesado de la bentonita	133
Figura 37 Preparación de la solución de bentonita	134
Figura 38 Coagulante y floculante.....	134
Figura 39 Preparación de las muestras de agua	135
Figura 40 Medición y adición de la dosis de coagulante y floculante	135
Figura 41 Preparación de la prueba de jarras.....	136
Figura 42 Proceso de coagulación	137
Figura 43 Proceso de floculación.....	137
Figura 44 Proceso de sedimentación.....	138

Resumen

El acceso a agua potable continúa siendo un problema crítico en diversas zonas del Perú, como en la ciudad de Pampas, provincia de Tayacaja, donde las fuentes hídricas presentan altos niveles de turbiedad y sólidos suspendidos totales (SST). Este estudio tuvo como objetivo evaluar la eficiencia del uso combinado de bentonita como coagulante y *Opuntia ficus-indica* como floculante en el tratamiento de aguas crudas provenientes de la captación de la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) de Pampas. Para ello, se aplicaron distintas dosis de ambos insumos naturales a muestras recolectadas durante las épocas de alta turbiedad y baja turbiedad, evaluando parámetros fisicoquímicos como pH, temperatura, conductividad eléctrica, turbiedad y SST. La caracterización inicial del agua indicó un pH promedio de 5,67, temperatura de 13,38 °C, conductividad de 353,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$, turbiedad de 88,75 UNT y concentración de SST de 109,25 mg/L. Los mejores resultados se obtuvieron con la aplicación conjunta de 30 mL de bentonita y 30 mL de *Opuntia ficus-indica*, logrando eficiencias de remoción de 98,74 % para turbiedad y 99,33 % para SST durante la alta turbiedad; mientras que, en baja turbiedad, aunque los valores fueron ligeramente menores, se mantuvo una alta efectividad, con remociones del 98,19 % y 93,10 %, respectivamente. En conclusión, el uso combinado de estos coagulantes naturales constituye una alternativa eficaz, económica y sostenible para el tratamiento de aguas en contextos rurales y con recursos limitados.

Palabras clave: coagulación, floculación, bentonita, *Opuntia ficus-indica*, turbiedad, parámetros fisicoquímicos.

Abstract

Access to safe drinking water remains a critical issue in several regions of Peru, such as the city of Pampas, in the province of Tayacaja, where water sources show high levels of turbidity and total suspended solids (TSS). This study aimed to evaluate the efficiency of the combined use of bentonite as a coagulant and *Opuntia ficus-indica* as a flocculant in the treatment of raw water collected from the intake of the Pampas drinking water treatment plant (DWTP). To this end, different doses of both natural agents were applied to water samples collected during periods of high and low turbidity, evaluating physicochemical parameters such as pH, temperature, electrical conductivity, turbidity, and TSS. The initial water characterization showed an average pH of 5,67; temperature of 13,38 °C; conductivity of 353,5 µS/cm; turbidity of 88,75 NTU; and TSS concentration of 109,25 mg/L. The best results were obtained with the combined application of 30 mL of bentonite and 30 mL of *Opuntia ficus-indica*, achieving removal efficiencies of 98,74 % for turbidity and 99,33 % for TSS during high turbidity periods. During low turbidity conditions, although the values were slightly lower, high effectiveness was maintained, with removal rates of 98,19 % and 93,10 %, respectively. In conclusion, the combined use of these natural coagulants represents an effective, economical, and sustainable alternative for water treatment in rural contexts with limited resources.

Keywords: *coagulation, flocculation, bentonite, Opuntia ficus-indica, turbidity, physicochemical parameters.*

I. Introducción

El agua dulce es un recurso esencial para la vida en el planeta. Sin embargo, su disponibilidad es limitada: representa solo el 3 % del total del agua existente en la Tierra y, de este porcentaje, apenas el 1 % es accesible para el consumo humano directo, al encontrarse en ríos, lagos y aguas subterráneas poco profundas (García, 2018). La presión sobre estas fuentes ha aumentado debido al crecimiento poblacional, la expansión urbana, la actividad agrícola intensiva y el cambio climático, factores que deterioran progresivamente la calidad del recurso. Este deterioro, a su vez, impacta negativamente la salud pública, la seguridad alimentaria, la biodiversidad y la economía.

La calidad del agua se ve amenazada por la presencia de contaminantes físicos, químicos y biológicos, como sólidos suspendidos, metales pesados, pesticidas, materia orgánica, patógenos y residuos industriales. Según la Organización de las Naciones Unidas (2015), cerca del 80 % de las aguas residuales generadas en el mundo se descargan al ambiente sin tratamiento, lo cual agrava los problemas de contaminación de las fuentes hídricas. Esta situación tiene repercusiones especialmente graves en regiones donde el acceso a sistemas de tratamiento es limitado, como ocurre en muchas zonas rurales de América Latina.

En el Perú, el acceso desigual al agua potable sigue siendo un reto estructural. La situación es crítica no solo en las grandes ciudades como Lima, amenazadas por la escasez proyectada al año 2040 (PCM, 2023), sino también en regiones altoandinas como Huancavelica, donde muchas comunidades rurales dependen directamente de fuentes superficiales como ríos, manantiales o quebradas. En la región de Huancavelica, especialmente en el distrito de Pampas, los problemas relacionados con el acceso a agua tratada son persistentes. Las fuentes superficiales utilizadas por la población presentan elevados niveles de turbiedad, especialmente en época de lluvias, cuando el arrastre de sedimentos aumenta. La limitada cobertura de plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) y la escasez de tecnologías apropiadas han llevado a que muchas familias consuman agua cruda, lo que incrementa la incidencia de enfermedades gastrointestinales y otros riesgos sanitarios (Acevedo y Huamán, 2021). Frente a este escenario, resulta urgente identificar soluciones eficaces, de bajo costo y

sostenibles, especialmente en zonas rurales donde los recursos financieros e infraestructurales son escasos.

En los últimos años, diversas investigaciones han explorado el uso de coagulantes y floculantes naturales como alternativa a los productos químicos convencionales utilizados en el tratamiento del agua. Entre los materiales más estudiados se encuentra la bentonita, una arcilla de origen volcánico con propiedades adsorbentes y capacidad para desestabilizar partículas coloidales suspendidas, facilitando su aglomeración y sedimentación (Carrasquero et al., 2020). Paralelamente, se ha demostrado que la *Opuntia ficus-indica*, planta ampliamente distribuida en zonas altoandinas como Huancavelica, tiene un gran potencial como floculante natural debido al contenido de mucílagos en sus cladodios. Estos compuestos, principalmente polisacáridos, permiten la formación de flóculos grandes y estables al unir las partículas coaguladas, mejorando la eficiencia del proceso de clarificación (Guevara, 2019).

Diversos estudios en México, Colombia y el norte del Perú han reportado eficiencias superiores al 90 % en la remoción de turbiedad utilizando bentonita y extractos de *Opuntia ficus-indica*. Su disponibilidad local, bajo impacto ambiental, fácil aplicación y bajo costo hacen de estos materiales una alternativa viable para su implementación en comunidades rurales con acceso limitado a tecnología. Sin embargo, en la región de Huancavelica, aún se requiere validar su eficiencia bajo condiciones reales, con aguas crudas provenientes de fuentes superficiales locales, tomando en cuenta las variaciones estacionales.

En este contexto, la presente investigación se propone evaluar la eficiencia del uso combinado de bentonita y *Opuntia ficus-indica* como coagulante-floculante natural en el tratamiento de aguas crudas superficiales del distrito de Pampas, en la región Huancavelica. El objetivo es determinar su potencial como alternativa ecológica, técnica y económicamente viable frente a los métodos convencionales, y así contribuir a mejorar la calidad del agua tratada disponible para consumo humano en comunidades rurales vulnerables.

1.1. Planteamiento del problema

El agua dulce es un recurso limitado en el planeta, representando solo el 3 % del agua total, de la cual apenas el 1 % es accesible para el consumo humano (García, 2018). La calidad de este recurso vital se ve constantemente amenazada por factores ambientales y actividades humanas, como la deforestación, el uso intensivo del suelo, los vertimientos domésticos e industriales, y la contaminación de fuentes naturales. En este contexto, la turbiedad es un parámetro clave para evaluar la calidad del agua cruda, es decir, aquella que no ha sido sometida a ningún proceso de tratamiento, ya que refleja la presencia de partículas en suspensión, incluyendo sedimentos, materia orgánica, microorganismos patógenos y compuestos químicos peligrosos (Martínez et al., 2020).

Niveles elevados de turbiedad en el agua superficial dificultan el proceso de potabilización, ya que afectan la eficiencia de la desinfección con agentes como el cloro, protegiendo a microorganismos como *Giardia* y *Cryptosporidium*. Asimismo, promueven la formación de subproductos como los trihalometanos, que implican riesgos crónicos para la salud. Además, una alta turbiedad incrementa el uso de insumos químicos y genera residuos secundarios, elevando los costos de tratamiento del agua (Marco, Azario y Metzger, 2004). Por estas razones, el control de la turbiedad en las etapas iniciales del tratamiento de aguas crudas es fundamental para garantizar una adecuada calidad del agua tratada.

En Perú, la escasez hídrica se ha agravado por el crecimiento urbano y el cambio climático. En Lima, por ejemplo, el estrés hídrico proyectado para el año 2040 podría superar el 80 %, lo cual obliga a recurrir a fuentes de agua cruda sin el tratamiento adecuado (PCM, 2023). Esta situación no es exclusiva de la capital: en regiones rurales altoandinas como Huancavelica, muchas poblaciones dependen de fuentes de agua superficial contaminadas, con altos niveles de turbiedad, que no son sometidas a procesos de tratamiento apropiados. En el distrito de Pampas, capital de la provincia de Tayacaja, la calidad del agua cruda captada para consumo humano ha mostrado deficiencias significativas, principalmente asociadas a la turbiedad, lo que representa un riesgo directo para la salud pública y evidencia limitaciones en la infraestructura y gestión del recurso hídrico.

Si bien se han documentado los efectos negativos de la turbiedad elevada y se han propuesto soluciones tecnológicas en otras regiones del país, existe un vacío de conocimiento en torno a la aplicación y eficacia de coagulantes naturales como la bentonita y *Opuntia ficus-indica* en el tratamiento de agua cruda proveniente de fuentes superficiales en zonas altoandinas como Huancavelica. No se cuenta con estudios específicos que validen su desempeño en condiciones reales locales, tomando en cuenta factores como las variaciones estacionales (épocas de alta turbiedad y baja turbiedad), el tipo de sedimento, las características fisicoquímicas del agua y la dosificación óptima. Este vacío impide establecer una base técnica sólida para su implementación a escala comunitaria o municipal en contextos rurales.

En este sentido, la presente investigación busca dar respuesta a esta problemática y cerrar dicha brecha de conocimiento, evaluando el uso de bentonita y *Opuntia ficus-indica* como coagulante-floculante natural en el tratamiento de aguas crudas captadas de fuentes superficiales en Pampas (Huancavelica). La finalidad es determinar su eficacia para reducir la turbiedad, su impacto sobre otros parámetros fisicoquímicos y su viabilidad como alternativa técnica, económica y ambientalmente sostenible frente a los coagulantes químicos convencionales.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cómo influye el uso de bentonita y *Opuntia ficus-indica* como coagulante-floculante para el tratamiento de aguas crudas en Pampas?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es el efecto de la dosis de bentonita y *Opuntia ficus – indica* sobre la remoción de la turbiedad de aguas crudas en condiciones de alta y baja turbiedad?
- ¿Cuál es el efecto de la dosis de bentonita y *Opuntia ficus – indica* sobre los parámetros fisicoquímicos (pH, Temperatura y Conductividad) de aguas crudas en condiciones de alta y baja turbiedad?

1.3. Justificación

1.3.1. *Justificación ambiental*

La disponibilidad y calidad del agua constituyen factores críticos para garantizar la sostenibilidad ambiental, especialmente en ecosistemas frágiles como los de zonas altoandinas. En el distrito de Pampas, región Huancavelica, la principal fuente de abastecimiento hídrico proviene de cuerpos superficiales como ríos y manantiales, los cuales presentan altos niveles de turbiedad debido a la escorrentía, la remoción de suelos y la materia orgánica en suspensión. Esta condición no solo compromete la calidad del recurso hídrico, sino que también representa un desafío técnico en las etapas iniciales de tratamiento, dificultando la remoción eficiente de sólidos suspendidos y generando residuos secundarios contaminantes.

El tratamiento convencional mediante coagulantes químicos, como el sulfato de aluminio, ha demostrado ser eficaz para la remoción de turbiedad; sin embargo, su uso conlleva impactos ambientales significativos. Los lodos generados durante el proceso contienen compuestos ecotóxicos que, al ser dispuestos en el ambiente, alteran negativamente la composición del suelo y la calidad de los cuerpos receptores de agua, generando contaminación secundaria (Llovera y Chuquipoma, 2023). Esta situación compromete la sostenibilidad de los sistemas de tratamiento, especialmente en contextos ecológicamente sensibles.

Frente a ello, surge la necesidad de explorar alternativas de tratamiento que reduzcan el impacto ambiental y favorezcan un manejo más sustentable de los recursos hídricos. En este sentido, el uso de coagulantes-floculantes naturales como la bentonita y *Opuntia ficus-indica* representa una estrategia prometedora. La bentonita, un mineral arcilloso con alta capacidad de adsorción, permite atrapar eficazmente partículas coloidales, mientras que los mucílagos presentes en *Opuntia ficus-indica* actúan como floculantes naturales, promoviendo la aglomeración y sedimentación de sólidos suspendidos (Alvarado et al., 2024).

Estos coagulantes naturales presentan ventajas ambientales significativas:

- No generan residuos tóxicos ni alteran negativamente los ecosistemas receptores, permitiendo un tratamiento más limpio y compatible con la dinámica ecológica local.
- Son biodegradables y ambientalmente inertes, lo que minimiza la acumulación de compuestos nocivos en suelos o cuerpos de agua.
- Favorecen prácticas de tratamiento compatibles con los principios de sostenibilidad, al reducir la carga contaminante asociada al tratamiento del agua cruda.

Asimismo, el uso de insumos naturales disponibles en el entorno permite disminuir la presión sobre los recursos químicos industriales, promoviendo enfoques de bajo impacto y alineados con el cuidado de los ecosistemas altoandinos. De esta forma, se garantiza que el tratamiento del agua no implique una carga ambiental adicional para el territorio.

En resumen, la presente investigación se justifica desde una perspectiva ambiental, al buscar evaluar alternativas de tratamiento de agua cruda que reduzcan la turbiedad sin generar efectos colaterales sobre el medio ambiente. El análisis de la eficacia de la bentonita y *Opuntia ficus-indica* permitirá generar evidencia científica aplicable en zonas ecológicamente vulnerables, favoreciendo la gestión sostenible del recurso hídrico y la protección de los ecosistemas circundantes.

1.3.2. Justificación social

Actualmente, los coagulantes utilizados para la correcta eliminación de la turbiedad del agua son, en su mayoría, productos sintéticos compuestos por metales inorgánicos como el aluminio y el hierro, siendo el sulfato de aluminio y el cloruro férrico los más comunes. Si bien el sulfato de aluminio puede eliminar entre el 90% y 99% de los microorganismos y partículas en suspensión bajo condiciones óptimas, su asimilación en el cuerpo humano a largo plazo se asocia con efectos adversos para la salud, incluyendo enfermedades neurodegenerativas como el Alzheimer y otros trastornos cognitivos (Sánchez, 2022).

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el agua destinada al consumo humano debe mantenerse por debajo de un límite máximo de 5 unidades nefelométricas de turbiedad (UNT), siendo el valor recomendado 1 UNT para garantizar su inocuidad (Martínez et al., 2020). La responsabilidad de garantizar estos estándares recae en las entidades encargadas del suministro y tratamiento del agua potable, quienes deben implementar procesos adecuados de remoción de turbiedad.

En este contexto, el uso de coagulantes y floculantes naturales como la bentonita y *Opuntia ficus-indica* representa una alternativa socialmente viable y segura. La implementación de estos recursos ofrece una solución accesible y sostenible para la remoción de turbiedad, mejorando significativamente la calidad del agua destinada al consumo humano (Guevara, 2019).

Las ventajas del uso de coagulantes naturales son evidentes:

- Seguridad para la salud: Al ser materiales naturales y no tóxicos, eliminan los riesgos de acumulación de metales en el organismo, protegiendo la salud de la población.
- Bajo costo y accesibilidad: Tanto la bentonita como la penca de tuna son recursos económicos y disponibles localmente, lo cual facilita su implementación en comunidades de bajos recursos.
- El impacto positivo que genera en la comunidad: La funcionalidad de (*Opuntia ficus-indica*) no solo resuelve problemas medioambientales, sino que, además, promueve el uso de los recursos disponibles en la agricultura de la zona, favoreciendo la economía de la región.

La escasez de agua potable y la alta turbiedad de las fuentes hídricas en Pampas hacen urgente la búsqueda de soluciones innovadoras y sostenibles. La bentonita y *Opuntia ficus-indica* ofrecen un método eficiente y natural que responde a las necesidades de la población, al tiempo que minimizan los impactos negativos asociados a los coagulantes químicos. Su uso contribuirá a mejorar la calidad de vida de la comunidad, garantizar el acceso a agua segura y promover prácticas sostenibles que beneficien tanto a las personas como al medio ambiente.

1.3.3. *Justificación económica*

El uso de coagulantes naturales, como la *Opuntia ficus-indica* y la bentonita, representa una alternativa económica y viable frente a los coagulantes químicos tradicionales utilizados en el tratamiento de aguas. Estos coagulantes de origen biológico y mineral son ampliamente valorados por su abundancia en la naturaleza, bajo costo, inocuidad, biodegradabilidad y versatilidad (Llovera y Chuquipoma, 2023). En comparación con coagulantes sintéticos como el sulfato de aluminio y el cloruro férrico, cuyos costos de producción, transporte y aplicación son elevados, los coagulantes naturales permiten reducir significativamente los gastos operativos, lo que los convierte en una solución más accesible para comunidades con recursos limitados.

Además, la producción y el uso de la *Opuntia ficus-indica* y la bentonita pueden fomentar economías locales. La penca de tuna, al ser una planta de cultivo abundante y de bajo mantenimiento en regiones áridas y semiáridas, no solo reduce los costos de adquisición y transporte, sino que también promueve la generación de ingresos a través de la agricultura local. Por otro lado, la bentonita, un recurso mineral económico y ampliamente disponible, no requiere procesos complejos de procesamiento, lo que disminuye aún más los costos asociados al tratamiento del agua. Así, la implementación de estos coagulantes naturales no solo ofrece una alternativa económicamente favorable, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental y al desarrollo económico de las comunidades que dependen del acceso a agua potable segura (Gaspar, 2021).

1.4. Objetivos

1.4.1. *Objetivo general*

Evaluar la influencia del uso de bentonita y *Opuntia ficus-indica* como coagulante-floculante para el tratamiento de aguas crudas en Pampas.

1.4.2. *Objetivos específicos*

- Determinar el efecto de la dosis de bentonita y *Opuntia ficus- indica* sobre la remoción de la turbiedad de aguas crudas en condiciones de alta y baja turbiedad.
- Determinar el efecto de la dosis de bentonita y *Opuntia ficus- indica* sobre los parámetros físicoquímicos (pH, Temperatura y Conductividad) de aguas crudas en condiciones de alta y baja turbiedad.

1.5. Formulación de hipótesis

1.5.1. *Hipótesis general*

El uso combinado de bentonita y *Opuntia ficus-indica* como coagulante-floculante influye significativamente para el tratamiento de aguas crudas, Pampas.

1.5.2. *Hipótesis específicas*

- La variación de dosis de la bentonita y *Opuntia ficus- indica* tiene un efecto significativo sobre la remoción de la turbiedad de aguas crudas en condiciones de alta y baja turbiedad.
- La variación de dosis de la bentonita y *Opuntia ficus- indica* tiene un efecto significativo sobre los parámetros físicoquímicos (pH, Temperatura y Conductividad) de aguas crudas en condiciones de alta y baja turbiedad.

II. Marco teórico

2.1. Antecedentes

2.1.1. Internacionales

Othmani et al., (2020) en su trabajo de investigación “*Characterization of two cactus formulation-based flocculants and investigation on their flocculating ability for cationic and anionic dyes removal*” evaluaron la eficacia floculante de dos formulaciones naturales de cactus (*Opuntia ficus-indica*): cladodios secados en horno (DP) a 60 °C y liofilizados (LP), como alternativa a los floculantes químicos sintéticos en la eliminación de colorantes de aguas residuales. Para ello, se empleó el método de coagulación-floculación en soluciones de colorantes catiónicos (azul de metileno, MB) y aniónicos (naranja de metilo, MO). Se analizó la eficiencia de remoción de color y turbiedad con ambas formulaciones en combinación con alumbre como coagulante, además de su estabilidad en almacenamiento. Los resultados mostraron que el polvo liofilizado (LP) fue el más eficiente, logrando reducciones del 83 % en color y 69 % en turbiedad para MB, y del 63 % y 62 %, respectivamente, para MO. Además, su actividad floculante se mantuvo estable durante ocho meses. En conclusión, los cladodios liofilizados de cactus demostraron ser una alternativa ecológica eficaz a los floculantes sintéticos, mejorando el rendimiento del alumbre y ofreciendo una solución sostenible para el tratamiento de aguas residuales.

Dkhissi et al., (2023) en su trabajo de investigación “*Vegetable Oil Refinery Wastewater Treatment by Using the Cactus as a Bio-flocculant in the Coagulation-Flocculation Process*”, indican que en el laboratorio de Gestión de Procesos y Medio Ambiente, Facultad de Ciencias y Técnicas Mohammedia, Universidad Hassan II de Casablanca, Marruecos, se evaluó el uso de biocoagulantes para reducir la contaminación en aguas residuales generadas durante el proceso de refinado de petróleo, lo que resultó relevante ya que se aprovecha los recursos naturales, como los cactus, disponibles en Marruecos. Donde, el biocoagulante, derivado del jugo de tuna, se presenta como un nuevo

floculante orgánico biodegradable, dando como resultado que la dosis óptima de extracto de tuna varió entre 10 mg/L y 40 mg/L, lo que condujo a eficiencias de eliminación de contaminantes que oscilaron entre el 40% y el 90%. Además, los datos recopilados mostraron porcentajes de eliminación entre el 86% y el 99% para la turbiedad, entre el 62% y el 76% para la demanda química de oxígeno (DQO), y entre el 67% y el 95% para la decoloración del agua. Es relevante destacar que los biofloculantes demostraron ser efectivos en el tratamiento de aguas residuales en una escala de laboratorio, utilizando un piloto de 50 litros, y a un costo menor en comparación con otros métodos, el uso de biofloculantes representa una alternativa respetuosa con el medio ambiente en comparación con los floculantes sintéticos, y es especialmente adecuado para el tratamiento de aguas residuales que contienen niveles elevados de aceites y grasas. No obstante, se necesita llevar a cabo una investigación adicional para comprender mejor los diversos parámetros que influyen en su aplicación a gran escala.

Choudhary et al., (2019) en su investigación “*Evaluation of the potential application of cactus (Opuntia ficus-indica) as a bio-coagulant for pre-treatment of oil sands process-affected water*”, mencionan que el Instituto Indio de Tecnología Kharagpur, en Bengala Occidental, India, se realizó un estudio en el que se utilizó el mucílago acuoso de *Opuntia ficus - indica* (OFI), un tipo de cactus, como biocoagulante en el pretratamiento de OSPW (agua afectada por el proceso de arenas bituminosas). Para ello, se realizaron pruebas de coagulación y floculación tanto en agua turbia de laboratorio como en OSPW para evaluar el rendimiento de este biocoagulante en diferentes tipos de agua con niveles variables de turbiedad. El estudio investigó diversos parámetros operativos, como la turbiedad inicial, el pH, la presencia de diferentes sales, el tiempo de almacenamiento y la dosis del biocoagulante. Se observó que el biocoagulante funcionó de manera excepcional al eliminar el 98% de la turbiedad del OSPW cuando se utilizó a un pH inicial de 7 y 8, con una dosis de 1500 mg/L en un período de 60 minutos. Por otro lado, un aspecto interesante del proceso fue la formación de flóculos grandes que se

asemejaban a hilos, lo que sugiere que el mecanismo de coagulación de *Opuntia ficus - indica* (OFI) podría estar relacionado con la adsorción mejorada mediante la creación de enlaces entre las partículas en suspensión. Además, se comparó el biocoagulante con el uso de alumbre, y se observó que el biocoagulante generaba un lodo compacto con un volumen menor en comparación con el alumbre, lo que resalta su eficacia en el proceso de tratamiento del agua.

Carolina et al., (2022) en su estudio “*Evaluation of Turbidity and Color Removal in Water Treatment: A Comparative Study between (Opuntia ficus-indica) Fruit Peel Mucilage and FeCl₃*”, realizado en Colombia, investigaron el uso mucílago extraído de la cáscara del fruto de *Opuntia ficus - indica* como biocoagulante en el tratamiento de aguas turbias sintéticas y se comparó con un coagulante químico tradicional (FeCl₃). Se analizaron los efectos de la dosis de coagulante y el pH en la reducción de la turbiedad y la eficiencia de eliminación de color del agua turbia sintética. Además, para comprender el mecanismo de coagulación, los flóculos producidos bajo valores óptimos se caracterizaron estructuralmente (FTIR y potencial zeta) y morfológicamente (SEM). Se determinó que la condición óptima para la remoción de turbiedad y color fue una dosis de coagulante de 12 mg/L a pH 13. Para los valores óptimos, el biocoagulante y el FeCl₃ mostraron una remoción máxima de $82,7 \pm 3,28\%$ y $94,63 \pm 0,98\%$ para turbiedad y $71,82 \pm 2,72\%$ y $79,94 \pm 1,77\%$ para el color, respectivamente. Cabe destacar que, la estructura y morfología de los flóculos reveló que el mecanismo de coagulación del mucílago fue la adsorción y la formación de puentes, mientras que el del FeCl₃ fue la neutralización de carga. Estos resultados indican que el mucílago extraído de *Opuntia ficus - indica* podría ser una alternativa efectiva para reemplazar FeCl₃ como coagulante en el tratamiento de aguas turbias, lo que podría tener beneficios ambientales y económicos al reducir la dependencia de coagulantes químicos convencionales.

Alsaeed et al., (2022) en su estudio “*Using bentonite clay as coagulant aid for removing low to medium turbidity levels*” se evaluó el efecto del uso de arcilla bentonita como coadyuvante de coagulación a través de

múltiples experimentos realizados en diferentes condiciones estacionales y niveles de turbiedad inicial, que variaron de bajos a moderados. Los resultados demostraron que la adición de una pequeña dosis de bentonita (5 mg/L) mejoró la eficiencia de coagulación entre un 5% y 7,5% para una dosis de alumbre de 10 mg/L, y entre un 10,6% y 14% para una dosis de alumbre de 15 mg/L. Asimismo, se analizó el impacto de factores como el pH, la temperatura, el tiempo de sedimentación y la velocidad de mezcla. El mejor rendimiento de la bentonita se observó en valores de pH de 5 a 6 y en un rango de temperatura de 10 °C a 25°C, donde la mejora en la eliminación de turbiedad fue aproximadamente del 30% en niveles bajos y del 9% en niveles altos. Respecto al tiempo de sedimentación y a la velocidad de mezcla, los resultados indicaron que el tiempo óptimo fue de 90 minutos y la velocidad de agitación ideal fue de 200 rpm.

Temochko et al., (2025) en su estudio “*Characterization of Polycationic Bentonite Clay and its Use as a Coagulation Aid to Enhance Turbidity Removal in Water Treatment Plants*” tuvo como objetivo evaluar la viabilidad del uso combinado de cloruro de polialuminio (PAC) y bentonita policationica para mejorar la eficiencia del proceso de coagulación en aguas con baja turbidez. Para ello, se caracterizó la bentonita mediante análisis termogravimétrico (TGA), espectroscopía FTIR, difracción de rayos X (DRX) y mediciones de potencial zeta, evidenciando una pérdida de peso del 10,6 %, la presencia de montmorillonita y un potencial zeta promedio de -36,60 mV, lo cual indica estabilidad coloidal. Posteriormente, se realizaron ensayos de coagulación con PAC en diferentes dosis (17, 35 y 45 mg/L de Al₂O₃) según la turbidez inicial del agua (7,6, 21,3 y 29,6 NTU), comparando tratamientos con PAC solo y con PAC más bentonita. Los resultados mostraron que la adición de bentonita mejoró significativamente la remoción de turbidez, reduciendo entre un 28 % y 57 % la turbidez final respecto al uso exclusivo de PAC. Además, se obtuvo una eficiencia de remoción de color superior al 86 % en aguas de baja turbidez, demostrando el potencial de la bentonita policationica como coadyuvante en el tratamiento de aguas crudas.

Megersa et al., (2024) en su estudio “*Treatment of turbid surface water using Opuntia ficus-indica as a plant-based coagulant.*” evaluaron el uso del extracto de *Opuntia ficus-indica* como coagulante natural en el tratamiento de aguas superficiales turbias. El objetivo del estudio fue determinar la eficacia del mucílago vegetal en la remoción de turbidez de muestras reales y sintéticas. Se realizaron ensayos de coagulación en el laboratorio de la Universidad Madda Walabu, aplicando dosis entre 10 y 50 mg/L sobre muestras con diferentes niveles de turbidez inicial (33, 60 y 100 NTU), utilizando solución salina (0,5% NaCl) como medio de disolución. Los parámetros físico-químicos fueron medidos según protocolo estándar. Los resultados mostraron que la dosis óptima varió con la turbidez inicial: a 20 mg/L se logró reducir a 5 NTU en agua de 33 NTU, mientras que a 60 y 100 NTU se obtuvo hasta 95% de remoción con 40 mg/L. Además, el extracto vegetal mantuvo el pH del agua estable en comparación con el sulfato de aluminio (alumbre), el cual lo redujo drásticamente. Estos hallazgos confirman que *O. ficus-indica* es un coagulante vegetal efectivo, económico y sostenible para el tratamiento de agua turbia, especialmente útil en regiones rurales donde el acceso a tecnologías convencionales es limitado.

2.1.2. Nacionales

De La Cruz, (2019) en su estudio “*Remoción de turbidez, color y Escherichia coli en agua para consumo humano, utilizando arcilla bentonita y moringa (Moringa oleifera Lam.) – Amazonas, Perú*” evaluó la eficiencia de la arcilla bentonita y el polvo de *Moringa oleifera* en la remoción de turbidez, color y *Escherichia coli* en agua para consumo humano, sin generar impactos negativos sobre el ambiente. El estudio se desarrolló en la quebrada Nicaragua, en la región Amazonas, aplicando coagulantes naturales bajo distintas condiciones de pH (2 a 10) y concentraciones (150 y 200 mg/L). Los resultados mostraron que la arcilla bentonita fue más efectiva, alcanzando remociones de hasta 96,7 % en turbidez y 96,4 % en color, especialmente a pH 3. Ambos coagulantes demostraron una alta capacidad de clarificación sin generar residuos tóxicos, lo cual los convierte en alternativas ambientalmente seguras

frente a coagulantes químicos convencionales como el sulfato de aluminio. La investigación aporta evidencia significativa sobre el uso de insumos naturales para el tratamiento de aguas crudas, destacando su potencial en zonas rurales o ecológicamente sensibles por su bajo impacto ambiental y alta biodegradabilidad.

Guevara, (2019) en su estudio "*Rendimiento floculante del mucílago de nopal y sulfato de aluminio en la clarificación del agua para consumo humano, Bagua, región Amazonas, 2018*", el objetivo de esta investigación fue evaluar el rendimiento floculante del mucílago de nopal (*Opuntia ficus-indica*) y de sulfato de aluminio en la clarificación de aguas para consumo humano. Las muestras de agua fueron recolectadas a la altura de 30 metros antes de la captación del agua con coordenadas UTM: 783723,62 Este/9379041,82 Norte el día 5 del mes 6 del año 2018 a las 08:00 a.m. En segundo lugar, el análisis físico-químico determinó una turbiedad inicial de 83 Unidades Nefelométricas (NTU) El método utilizado fue la prueba de jarras para determinar donde se encuentran las concentraciones óptimas de ambos floculantes. En el caso del mucílago de nopal, se evaluaron dosis de 10 ppm, 20 ppm, 30 ppm, 50 ppm y 70 ppm, encontrándose que la concentración de 30 ppm fue la más eficiente, logrando una remoción del 54,2% de la turbiedad. Por otro lado, para el sulfato de aluminio se aplicaron concentraciones de 20 ppm, 25 ppm, 30 ppm, 35 ppm y 40 ppm, siendo esta última (40 ppm) la que presentó el mejor rendimiento con una remoción de turbiedad del 74,7%.

Herrera et al., (2022) realizaron un artículo científico para una conferencia titulado "*Comparación de la eficiencia en la eliminación de turbiedad en aguas superficiales del río Mashcón mediante la dosificación de almidón de Solanum tuberosum, mucílagos de Salvia hispánica y (Opuntia ficus-indica) en la provincia de Cajamarca, 2022*". Esta investigación tuvo como objetivo comparar el tratamiento de aguas superficiales del río Mashcón utilizando diferentes biocoagulantes, como el almidón de *Solanum tuberosum*, los mucílagos de *Salvia hispánica* y (*Opuntia ficus-indica*), con el fin de reducir la turbiedad. Se empleó el método de la prueba del frasco, con agitación a 100 rpm durante 1 minuto a alta

velocidad y durante 3 minutos a baja velocidad a 40 rpm. Los resultados indicaron que tanto el almidón de *Solanum tuberosum* como los mucílagos de Salvia hispánica lograron una reducción de la turbiedad del 97%, mientras que (*Opuntia ficus-indica*) alcanzó una remoción del 98%, obteniendo una turbiedad final de 4,9 NTU, dentro del límite permitido para el agua potable según el Decreto Supremo N°. 004-2017-MINAN de las leyes peruanas (5 NTU). La conclusión extraída de este estudio es que los tres biocoagulantes demostraron ser efectivos para reducir la turbiedad del agua. No obstante, se destaca que (*Opuntia ficus-indica*) mostró una eficacia ligeramente superior, lo que sugiere su potencial uso en futuras aplicaciones para el tratamiento del agua. Este descubrimiento resalta la importancia de investigar y desarrollar métodos sostenibles y eficientes para mejorar la calidad del agua, especialmente en áreas donde el acceso a agua limpia es esencial para la salud pública y el bienestar de la comunidad.

Ortega et al., (2022) en su estudio “*Aloe Vera (L.) is a flocculant to remove turbidity from surface wáter*” se propusieron investigar el potencial del Aloe vera como un agente alternativo para la floculación en el tratamiento del agua. Con este propósito se realizaron ensayos que valoraban las características del gel de Aloe vera para la eliminación de la turbiedad, con caolín como sustancia que simulaba las impurezas presentes en el agua. En el desarrollo de la investigación se determinarían las concentraciones óptimas de alúmina y Aloe vera al 1%, considerando diferentes valores de pH y niveles de turbiedad iniciales. Los datos obtenidos se evaluaron exhaustivamente utilizando un modelo matemático de superficie de respuesta validándose con métodos gráficos y cálculos matemáticos. Los resultados mostraban que la turbiedad inicial, pH inicial y dosis del coagulante eran algunos de los factores que afectaban la reducción de la turbiedad de manera significativa. Utilizando el modelo de superficie de respuesta se deducía que la dosis de Aloe vera de un 1% óptima variaría entre 0,1 mL y 0,4 mL por cada 500 mL de agua dependiendo de los niveles de pH y turbiedad iniciales. Este dato permitió deducir que el uso de Aloe vera podría ser una alternativa interesante para

mejorar el tratamiento de aguas superficiales de Tingo María dando lugar a una alternativa sostenible para poder paliar los problemas de calidad de agua.

Mestanza, (2023) en su estudio “*Comparación de la eficiencia en la reducción de turbidez del agua usando la penca sábila (Aloe vera) respecto al nopal (Opuntia ficus-indica) en el distrito de Cumba, Utcubamba – Amazonas, 2022*” comparó la eficiencia del nopal (*Opuntia ficus-indica*) y la penca sábila (*Aloe vera*) como coagulantes naturales en la reducción de la turbidez del agua en la quebrada Piatana, distrito de Cumba, Amazonas. A partir de un agua cruda con una turbidez inicial de 115 NTU, se aplicaron diferentes dosis de ambos coagulantes naturales bajo condiciones controladas de pH ácido y alcalino mediante el test de jarras. Se obtuvo una remoción de hasta el 90,5 % con el nopal y un 95,5 % con la penca sábila, siendo esta última más efectiva en condiciones ácidas. La investigación destaca que estos coagulantes no generan residuos tóxicos ni afectan la composición del suelo ni del agua, lo que los convierte en alternativas ambientalmente sostenibles frente al uso de coagulantes químicos. Este estudio aporta evidencia sobre el potencial de insumos naturales biodegradables como soluciones ecoamigables en el tratamiento del agua.

2.1.3. Local

Acevedo y Huaman, (2021) llevaron a cabo la investigación titulada “*Eficacia del mucílago de nopal (Opuntia ficus-indica) como coagulante en la remoción de turbiedad del río Ichu - Huancavelica - 2019*”, con el objetivo principal de evaluar la capacidad del mucílago extraído de la planta de nopal (*Opuntia ficus-indica*) como agente coagulante para disminuir la turbiedad presente en el río Ichu. Para ello, se elaboró el coagulante utilizando pencas de la planta de tuna en una proporción de 1 parte de penca por 2 partes de agua. La investigación se llevó a cabo empleando una muestra de 60 litros de agua con niveles iniciales de turbiedad que oscilaban entre 1561 NTU y 1568 NTU. En el proceso de determinar la dosis más eficaz del coagulante de mucílago de nopal para

tratar el agua con turbiedad inicial en ese rango, se realizó un primer ensayo (Ensayo N° 01) que exploró diversas dosificaciones de coagulante natural, desde 10 hasta 60 ml por litro de agua, concluyendo que la dosis más eficaz fue de 40 ml/L. Posteriormente, en un segundo ensayo (Ensayo N° 02), se redujeron las dosificaciones a partir de 40 mL/L, probando con 5 mL/L, 12 mL/L, 15 mL/L, 25 mL/L, 35 mL/L y nuevamente 40 mL/L, confirmando que la dosis óptima seguía siendo de 40 mL/L. Esta dosis demostró una eficiencia de eliminación de turbiedad del 99,33%, con una turbiedad posterior al tratamiento de 10,47 NTU. Además, se llevó a cabo una comparación entre el coagulante de mucílago de nopal y el sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$, observándose que el coagulante natural tuvo una eficacia ligeramente superior, alcanzando el 99,15% de remoción de turbiedad, en comparación con el sulfato de aluminio que logró el 99,00%. Estos resultados destacan la eficacia prometedora del mucílago de nopal como una alternativa natural y efectiva en el tratamiento de aguas con alta turbiedad.

2.2. Bases teóricas y conceptuales

2.2.1. Teoría de la coagulación del agua

2.2.1.1. Coagulación

En la descripción detallada del proceso de coagulación, se produce la desestabilización de las partículas en suspensión, en el agua, por un proceso de neutralización de cargas electrostáticas de las partículas en suspensión en el agua; estos procesos favorecen la aglomeración y provocan la formación de flóculos. Es necesario mantener la dosis de coagulante adecuada como punto de partida para un tratamiento eficaz, de manera que una dosis elevada puede producir una reversión de carga, lo que conduciría a una no neutralización de las partículas y a la inhibición de la formación de flóculos; por consiguiente, el control de la dosis de coagulante tiene un determinante importante de cara a la optimización del proceso de coagulación y a mejorar el agua tratada (Terán, 2022).

2.2.1.2. Factores que influyen en el proceso

a) Tipo y cantidad de coagulante:

Cuando se trata de determinar la cantidad adecuada de coagulante para tratar el agua turbia, es esencial establecer la dosis precisa mediante experimentos utilizando la prueba de jarras, esto tiene mucha importancia para evitar el uso excesivo de coagulante, ya que una dosis excesiva puede destruir la acumulación superficial causando una alteración a la muestra que se quiere estudiar (Gutierrez et al., 2022).

b) pH de agua:

La medición de pH es de mucha relevancia, porque para cada tipo de coagulante, es necesario encontrar el nivel de acidez o alcalinidad óptimo que permita lograr una floculación eficaz en el menor tiempo posible. Además, ajustar el pH adecuadamente es esencial para optimizar la eficiencia del producto y la formación de flóculos (Gutierrez et al., 2022).

c) Periodo de coagulación

Es el proceso que ocurre entre la agitación final anexionando con el coagulante y esquivando la sedimentación de flóculos ya unidos entre sí, que experimentan la unión con el coagulante (Gutierrez et al., 2022).

d) Tiempo de mezcla y floculación (periodo de coagulación)

Tiempo que pasará entre la agitación final, más el tiempo que añaden el coagulante y el añadimiento de coagulante con rapidez para evitar la sedimentación de los flóculos que se formarán (Gaspar, 2021).

e) Temperatura de agua

La temperatura del coágulo básicamente requiere del tiempo, lo cual establece que cuando el agua este fría demorará más

tiempo que al estar el agua caliente, donde se reduce el tiempo de formación de coágulos (Gutierrez et al., 2022).

f) Agitación, presencia de núcleos

Sólidos que estarán suspendidos visibles a simple vista (Gutierrez et al., 2022).

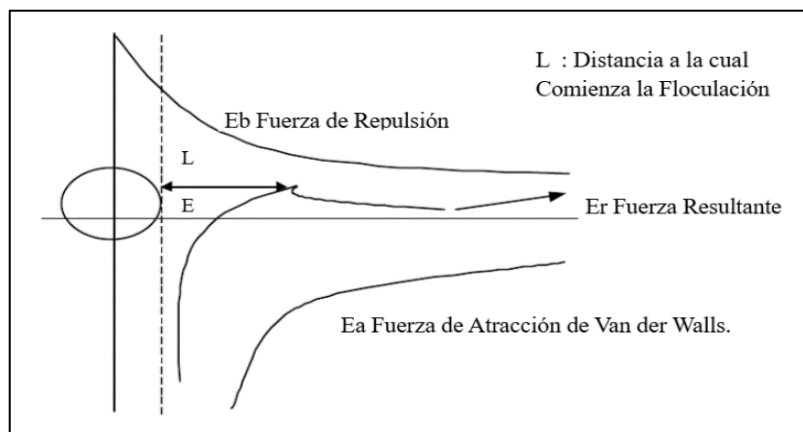
2.2.1.3. Mecanismos de coagulación

a) Comprensión de doble capa

Cuando partículas de naturaleza similar se aproximan, sus capas interaccionan, generando fuerzas de repulsión que se intensifican conforme las partículas se acercan más entre sí, debido a la presencia de iones con carga opuesta en la superficie de dichas partículas. Además de estas fuerzas, también entran en juego las fuerzas de Van der Waals, las cuales están condicionadas por factores como la densidad y la composición atómica de las partículas, y contribuyen a las interacciones entre ellas (Gaspar, 2021).

Figura 1

Fuerza de atracción y repulsión



Fuente: (Acevedo y Huaman, 2021).

b) Neutralización y absorción de cargas

Se considera como mecanismo de desestabilización predominante para las partículas coloidales, donde la

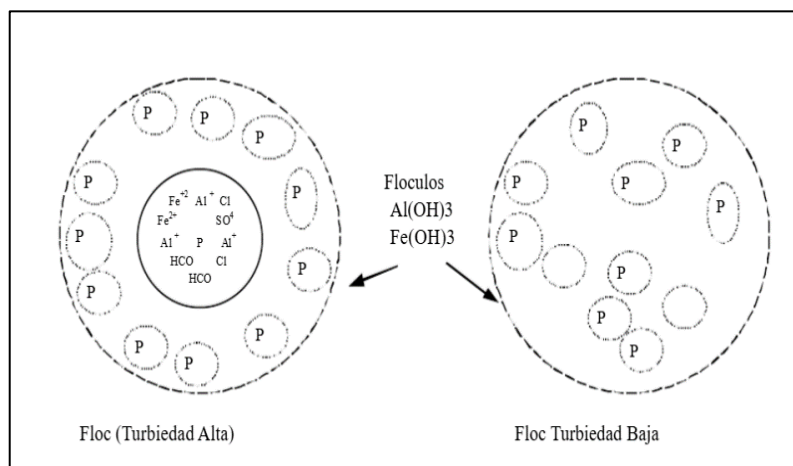
absorción de contraiones multivalentes en la superficie de partícula puede inducir la neutralización de carga y posterior coagulación (Gaspar, 2021).

c) Atrapamiento de partículas en un precipitado

Las partículas coloidales que han perdido su estabilidad pueden quedar atrapadas en el flóculo, esto sucede cuando se aumenta una cantidad suficiente de coagulante, normalmente cloruro férrico (FeCl_3) o sulfato de aluminio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, por lo que los flóculos están formados por moléculas de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ y $\text{Al}(\text{OH})_3$. Por si fuera poco, estas desempeñan el papel de anillo en la formación de flóculos y en presencia de determinados aniones, acelerando la formación del precipitado. Asimismo, este procedimiento resulta en una correlación inversa entre la cantidad de coagulante requerida y el grado de turbiedad del agua. En otras palabras, cuando el agua contiene una alta cantidad de partículas en suspensión (alta turbiedad), podría necesitarse una menor cantidad de coagulante para inducir la formación de flóculos y eliminar las partículas suspendidas (Briones et al., 2020).

Figura 2

Atrapamiento de partículas en un flóculo



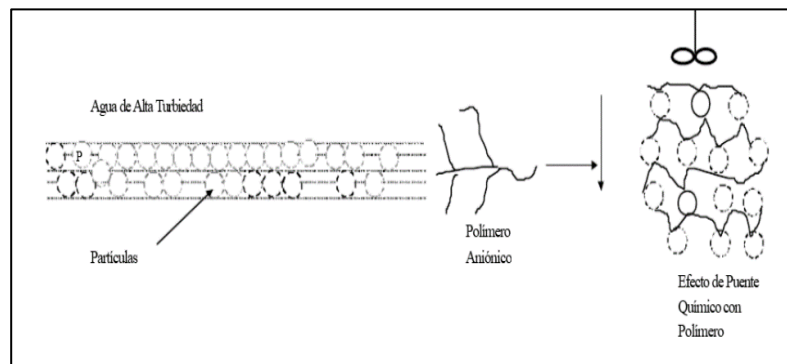
Fuente: (Acevedo y Huaman, 2021).

d) Puente y la absorción

Los polímeros, debido a su estructura molecular larga y la presencia de grupos químicos en sus extremidades y a lo largo de sus cadenas, pueden actuar como “puentes” que absorben y conectan partículas coloidales en una suspensión. Esto ayuda a estabilizar las partículas y mantenerlas dispersas en la solución coloidal (Gaspar, 2021).

Figura 3

Efecto de puente de partículas en suspensión



Fuente: (Acevedo y Huaman, 2021).

2.2.2. Teoría de la floculación

El término floculación tiene su origen en la palabra latina “flocculus”, que significa “formar grumos o espesar”, la floculación es un proceso que ocurre después de la coagulación y se basa en la formación de masas gelatinosas que, al ser agitadas, se agrupan para crear flóculos más grandes que pueden hundirse con mayor facilidad, estos flóculos, que comienzan siendo pequeños, se agrupan en aglomerados más grandes que finalmente pueden sedimentarse (Acevedo y Huaman, 2021).

El procedimiento es fundamental para garantizar la pureza del agua, ya que permite eliminar las impurezas que contaminan sus fuentes y mejorar su calidad conforme a las demandas de la población. No se limita a la remoción de contaminantes visibles, sino que también incluye el filtrado de microorganismos y sustancias químicas nocivas para la salud humana y el medio ambiente. Además, desempeña un papel crucial en el

tratamiento de aguas residuales, al eliminar sólidos suspendidos que, sin un tratamiento adecuado, pueden contener agentes patógenos y contaminantes químicos con graves consecuencias para la salud y los ecosistemas acuáticos. De esta manera, su aplicación no solo asegura un suministro de agua potable seguro, sino que también contribuye a la protección de los recursos hídricos y la biodiversidad acuática. Asimismo, su correcta implementación es clave para el cumplimiento de estándares ambientales y sanitarios, promoviendo así el bienestar social y ecológico. (Herrera et al., 2022).

2.2.3. *Teoría de la sedimentación*

Según, Tariq y Wim, (2023) es la sedimentación colectiva de partículas que están bajo la influencia de la gravedad o fuerzas centrífugas, un proceso que acontece continuamente en la naturaleza y en muchas aplicaciones industriales.

Como ejemplos se incluyen destitución de sedimentos en ríos, sedimentación de cenizas volcánicas, precipitaciones, cuencas de sedimentación en el tratamiento de aguas residuales, recuperación de tierras mediante la pulverización de voluminosas cantidades de sedimentos (Tariq y Wim, 2023).

2.2.4. *Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano*

El Decreto Supremo N° 031-2010-SA, emitido por el Ministerio de Salud (MINSA), establece las disposiciones para garantizar que el agua destinada al consumo humano cumpla con estándares de calidad que protejan la salud pública. Este reglamento define los requisitos físico-químicos, microbiológicos, organolépticos y radiactivos que el agua potable debe cumplir, además de regular la supervisión y fiscalización del servicio de abastecimiento de agua potable. (MINSA, 2010)

La norma establece límites máximos permisibles (LMP) para diversos contaminantes en el agua, asegurando su inocuidad y aptitud para el consumo humano. También asigna responsabilidades a los proveedores de agua, quienes deben realizar monitoreos periódicos para cumplir con los

estándares de calidad y evitar la contaminación del recurso hídrico. (MINSA, 2010)

Parámetros de Calidad del Agua

La calidad del agua se evalúa mediante diversos parámetros, clasificados en las siguientes categorías:

1. Parámetros Microbiológicos: Evalúan la presencia de microorganismos patógenos que pueden causar enfermedades.
2. Parámetros Físico-Químicos: Determinan la composición del agua y la presencia de sustancias químicas potencialmente peligrosas.
3. Parámetros Organolépticos: Evalúan características perceptibles como olor, color y sabor.
4. Parámetros Radiactivos: Regulan la presencia de radiación en el agua, asegurando que no represente riesgos para la salud.

A continuación, se presenta una tabla con los límites Máximos Permisibles de Parámetros de Calidad Organoléptica, Microbiológicos y Parasitológicos.

Tabla 1

Límites Máximos Permisibles de Parámetros de Calidad Organoléptica

Parámetro	Unidad de Medida	Límite Máximo Permisible (LMP)
Olor	-	Aceptable
Sabor	-	Aceptable
Color	UCV (escala Pt/Co)	15
Turbiedad	UNT	5
pH	Valor de pH	6,5 – 8,5
Conductividad (25°C)	µmho/cm	1 500
Sólidos Totales Disueltos	mg/L	1 000
Cloruros	mg Cl ⁻ /L	250
Sulfatos	mg SO ₄ ²⁻ /L	250
Dureza Total	mg CaCO ₃ /L	500
Amoniaco	mg N/L	1,5
Hierro	mg Fe/L	0,3
Manganeso	mg Mn/L	0,4
Aluminio	mg Al/L	0,2

Cobre	mg Cu/L	2,0
Zinc	mg Zn/L	3,0
Sodio	mg Na/L	200

Nota: Obtenido de (MINSA, 2010)

Tabla 2

Límites Máximos Permisibles de Parámetros Microbiológicos y Parasitológicos

Parámetro	Unidad de Medida	Límite Máximo Permissible (LMP)
Bacterias Coliformes Totales	UFC/100 mL a 35°C	0 (*)
<i>Escherichia coli</i> (<i>E. coli</i>)	UFC/100 mL a 44,5°C	0 (*)
Bacterias Coliformes Termotolerantes o Fecales	UFC/100 mL a 44,5°C	0 (*)
Bacterias Heterotróficas	UFC/mL a 35°C	500
Huevos y larvas de Helmintos, quistes y ooquistes de protozoarios patógenos	Nº org/L	0
Virus	UFC/mL	0
Organismos de vida libre (algas, protozoarios, copépodos, rotíferos, nemátodos en todos sus estadios evolutivos)	Nº org/L	0

Nota: Obtenido de (MINSA, 2010), (*) En caso de analizar por la técnica del NMP por tubos múltiples = < 1,8 /100 mL.

2.3. Bases Conceptuales

2.3.1. Calidad del agua

La importancia de la calidad del agua está motivada por su conceptualización, por cierto, más allá de su estado natural, sino considerándola también como la forma en que se presenta cuando se producen los efectos de las actividades del ser humano. La calidad del agua podría englobar la intervención de muchos factores, desde factores de su composición física, química de la salud biológica, lo que indica la complejidad de dicha calidad y su papel clave en mantener la vida y los ecosistemas acuáticos. Para traducir correctamente esta calidad en parámetros, se aplican estrictas directrices y estándares de reconocido prestigio internacional, como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y otras entidades comprometidas con el medio ambiente, que nos ofrecen

la estructura indispensable para ponderar que el agua utilizada para consumo humano y otros fines cumpla con los estándares requeridos de seguridad y calidad. No sólo estamos hablando de protección de la salud pública, sino también de la función en la conservación de la diversidad biológica y en el mantenimiento de la estabilidad de los ecosistemas acuáticos. Así, obtendremos un medio natural sostenible para las futuras generaciones, salvaguardando los recursos hídricos para un futuro próspero y sano (Villena, 2018).

A. Parámetros de control de calidad de agua

Antes de ser suministrada, el agua para consumo humano debe cumplir con rigurosos controles de calidad que aseguren su inocuidad y adecuación, protegiendo así la salud de la población. Esta vigilancia debe iniciarse desde la fuente hasta el punto de consumo, lo cual no solo garantiza la seguridad del suministro, sino que también permite una gestión sostenible de los recursos hídricos y la formulación de políticas públicas orientadas al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Villena, 2018). Algunos parámetros son:

a) Color: El agua no tiene un color por presencia de metales que interfieren en la coloración de la fuente de agua, tales como el manganeso, hierro, plancton, cromo y cobre disueltos. Dicho parámetro, se debe determinar pasado veinticuatro horas después de la toma de muestra y se expresa en unidades de color (UCV) (Acevedo y Huaman, 2021).

B. Principio del formulario

a) Turbiedad: Causado por partículas que se puede encontrar en suspensión afectando a primera vista la transparencia del agua, es muy importante para eliminar los microorganismos patógenos debido que las partículas que provocan la turbiedad protegen físicamente a los microorganismos de los efectos del desinfectante como el cloro. Este parámetro, se mide utilizando un turbidímetro cuyas unidades se denominan unidades de turbiedad nefelométricas (Jurado y Yzarra, 2021).

- b) Temperatura: Podrá influir en los procesos tanto químicos, físicos y como biológicos, relacionados a la conducción de agua potable, a su vez sujeta la calidad de agua en la cual se encontrará. Además, también afecta la temperatura a las funciones que realizarán los organismos acuáticos, que contribuye en la cantidad de oxígeno disueltos encontrados en el agua, este parámetro es de los más fundamental debido que puede modificar las características que contendrá el agua (Díaz y González, 2022).
- c) Conductividad: Es una medida de manera indirecta, que mide la concentración de sales, a su vez posee las soluciones acuosas, donde conduce a la corriente eléctrica, a través de iones que estarán disueltos, la cual los iones negativos se encuentran: cloruro, sulfato, carbonato y en los iones positivos: potasio, sodio, calcio, magnesio, señalar que la salinidad y conductividad tendrán relación debido a que la cantidad de iones disueltos se presenten aumentará los valores en ambos casos (Bautista et al., 2023).
- d) pH: Es una medida que varía entre acidez o alcalinidad en una sustancia, que va desde 0 a 14, lo cual de 0 a 6 se considerada como acidez, valores de 7 se le considera neutro, y valores entre 8 a 14 son considerados como alcalinidad o básico (Jurado y Yzarra, 2021). Además, es empleada para medir y controlar la acidez o alcalinidad que está en su mayoría en el tratamiento de agua y cuando se realiza procesos de coagulación los niveles de pH varían es por lo que es importante su medición (Jurado y Yzarra, 2021).

2.3.2. *Opuntia ficus-indica*

A. Taxonomía

Se presenta la clasificación taxonómica de la *Opuntia ficus-indica*.

Tabla 3

Taxonomía de la penca de la Opuntia ficus-indica

Taxonomía	
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida

Orden	Caryophyllales
Familia	Cacteaceae
Subfamilia	Opuntioideae
Género	<i>Opuntia</i>
Especie	<i>Ficus indica</i>
Nombre binominal	<i>Opuntia ficus – indica</i> (L.) 1768 Mill.
Nombre común	Penca de tuna (Perú y Latinoamérica); Cactus fruti (Estados Unidos); Higo (España); chumbo (Francia); Kaktusfeigen (Alemania)

Fuente: (Lopez y Pisco, 2023).

B. Procedencia de la penca de la *Opuntia ficus-indica*

La penca de la *Opuntia ficus-indica* es una cactácea ubicada en sitios áridos y semiáridos originarios de los territorios en la estribación oeste, entre Bolivia y Perú, es nativa de América Latina, esta fue empleada desde muchos años y es apreciada por su sabor y textura, también es empleada en la gastronomía a su vez en tratamientos medicinales por sus propiedades curativas lo cual es beneficioso para la salud de las personas (Acevedo y Huaman, 2021).

Es importante resaltar que, en América, las cactáceas desempeñaron un papel significativo en las civilizaciones precolombinas, siendo empleadas en la tintura de tejidos y fibras (Acevedo y Huaman, 2021).

En Perú, la planta de tunas tiene un uso principal en la producción de tunas y cochinilla, que se exportan a diferentes países. El origen de esta planta está vinculado a la cría de cochinillas, insectos cuyas hembras han sufrido adaptaciones morfológicas para vivir de manera fija en los cactus (Cesen y Rivas, 2022).

C. Mucílago de la penca de la *Opuntia ficus-indica*

La *Opuntia ficus-indica* produce un hidrocoloide denominado mucílago, un polisacárido fibroso capaz de formar redes moleculares con una alta capacidad de retención de agua. Este mucílago, de textura gomosa, se encuentra principalmente en los cladodios de la tuna y está compuesto por una mezcla neutra de 55 sacáridos de alto peso molecular. (Carhuas, 2023)

El mucílago de la *Opuntia ficus-indica* ha sido estudiado como una alternativa ecológica a los floculantes químicos para la clarificación del agua. Su efectividad se debe a la presencia de polisacáridos con carga negativa, que interactúan con partículas en suspensión promoviendo su aglutinación y sedimentación. (Guevara, 2019)

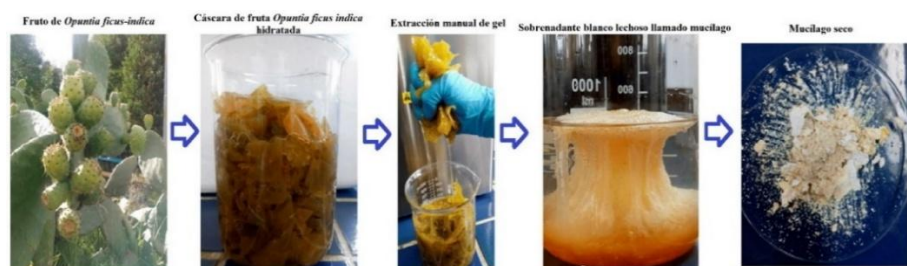
Un estudio realizado en Bagua, región Amazonas, evaluó la capacidad del mucílago de nopal en comparación con el sulfato de aluminio. A través de pruebas de jarras, se determinó que la dosis óptima de mucílago fue de 30 ppm, logrando una reducción de turbiedad del 54,2%, mientras que el sulfato de aluminio, en una dosis de 40 ppm, alcanzó una reducción del 74,7%. (Guevara, 2019)

Ventajas del mucílago de la *Opuntia ficus-indica* como floculante.

- Biodegradable y no tóxico: A diferencia de los floculantes químicos, el mucílago de nopal no genera residuos peligrosos.
- Menor impacto ambiental: Su uso reduce la presencia de aluminio residual en el agua, evitando efectos adversos en la salud humana y los ecosistemas acuáticos.
- Alternativa sostenible: Puede ser producido localmente, disminuyendo costos operativos y dependencia de productos químicos importados.

Figura 4

Fotografías seleccionadas del proceso de extracción del mucílago de las cáscaras del fruto de Opuntia ficus - indica



Fuente: Uso de la cáscara del fruto de *Opuntia ficus - indica* como nueva fuente de mucílago con características fisicoquímicas/moleculares coagulantes (Carolina et al., 2022).

2.3.3. *Bentonita*

La bentonita es un mineral arcilloso que se ha utilizado ampliamente como coagulante en procesos de tratamiento de agua. Su eficacia se debe a sus propiedades coloidales y su capacidad para adsorber contaminantes, lo que la convierte en una alternativa viable a los coagulantes químicos tradicionales, como el sulfato de aluminio (Carrasquero et al., 2015).

- **Composición y estructura:** La bentonita es un aluminosilicato hidratado, cuya estructura se compone de láminas tetraédricas y octaédricas. Esta disposición le confiere propiedades únicas, como la capacidad de expandirse y absorber grandes cantidades de agua, lo que mejora su rendimiento en procesos de coagulación-floculación (Carrasquero et al., 2015).
- **El uso de bentonitas modificadas para un mejor rendimiento:** Estudios han mostrado que la modificación de la bentonita, mediante la incorporación de almidón oxidado, puede aumentar su capacidad coagulante; de modo tal que este tipo de bentonitas muestran un mejor rendimiento en la reducción de la turbiedad e incremento de la formación de flóculos, existiendo la posibilidad de constituirse como un coagulante más eficiente que el comúnmente aplicado (Carrasquero et al., 2015).
- **Resultados en tratamientos:** En estudios específicos, el uso de bentonita como coadyuvante junto con sulfato de aluminio ha mostrado resultados sobresalientes, alcanzando tasas de remoción de turbiedad superiores al 99%. Esto se debe a que la bentonita permite reducir la dosis necesaria del coagulante químico primario, disminuyendo así los riesgos asociados a la presencia de metales pesados en el agua tratada (Carrasquero et al., 2015).

2.3.4. *Prueba de Jarras*

Es el procedimiento más frecuentemente empleado para calcular la cantidad requerida de una sustancia química y para evaluar otros parámetros que se desean analizar. Para ello, se simulan los actos de coagulación, floculación y sedimentación a un nivel de laboratorio y se

deben de realizar con una serie de jarras al mismo tiempo, variando la velocidad de agitación, influirán factores entre pH, temperatura, grado de agitación, tiempo de sedimentación, concentración de coagulante y temperatura. Es importante mencionar que, el pH, juega un papel importante en estudios de coagulación-floculación, a la vez de carga de partículas coloidales absorben iones OH⁻, donde el tiempo de coagulación es rápida exigiendo que la neutralización sea total antes que el coagulante haya iniciado a precipitar (Jaco et al., 2022).

La prueba de jarra implica el uso de seis o cuatros recipientes con una capacidad de 2 litros (preferiblemente) o 1 litro (alternativamente), evitando recipientes más pequeños para una dosificación precisa de coagulantes. También se utiliza un medidor que mide 30 revoluciones por minuto (RPM) para asegurar una velocidad uniforme de mezcla en todos los contenedores (Jaco et al., 2022).

III. Metodología

3.1. Tipo de investigación

El estudio fue de tipo aplicado, ya que se basó en el uso del conocimiento existente para desarrollar soluciones prácticas a problemas específicos, aprovechando los avances y descubrimientos de la investigación teórica para alcanzar objetivos concretos. Su enfoque se orientó hacia la implementación directa y rápida en situaciones reales, priorizando la aplicación práctica sobre el desarrollo de teorías (Lozada, 2014).

3.2. Nivel de investigación

El estudio se categorizó como de nivel explicativo, ya que intentó poner de manifiesto las relaciones de causa-efecto entre la dosis de bentonita utilizada como coagulante y la dosis de *Opuntia ficus-indica* utilizada como floculante. Se buscó descubrir por qué y cómo se produjo el fenómeno, estableciendo las razones que lo motivaron y sopesando las causas que pudieron tener un peso específico. Con este enfoque se identificaron causas mediante investigación post facto y efectos a través de estudios experimentales, utilizando pruebas de hipótesis. Los resultados obtenidos proporcionaron una comprensión profunda del fenómeno estudiado (Ramos, 2020).

3.3. Método de investigación

El enfoque metodológico adoptado fue de índole deductiva, con el objetivo de comprobar la eficacia de los procesos de coagulación y floculación en el tratamiento de agua cruda mediante el uso de bentonita y *Opuntia ficus-indica* como coagulantes-floculantes. Se buscó eliminar o reducir la turbiedad de las aguas crudas alimentadoras de la PTAP del distrito de Pampas, logrando que, tras el proceso de floculación, se mejorara la calidad físico-química del agua tratada. La investigación se basó en hipótesis formuladas científicamente y pruebas sistemáticas, con el fin de validar su viabilidad y eficacia, contribuyendo así a soluciones sostenibles para el tratamiento del agua en la región (Ramos, 2020).

3.3.1. Materiales

A. Reactivos y sustancias:

- Bentonita (como coagulante)
 - *Opuntia ficus-indica* (como floculante)
 - Agua cruda del río Viñas
- B. Equipos y dispositivos:
- Equipo de prueba de jarras (jar test)
 - Turbidímetro
 - Multiparámetro digital portátil
- C. Instrumentos de muestreo y medición:
- Frascos limpios y esterilizados (de vidrio o plástico de alta calidad)
 - Galones limpios y esterilizados (para muestras de 20 L)
 - Probetas graduadas
 - Vasos de precipitación
 - Peladores y cuchillos
 - Embudo de cristal
 - Papeles filtro adecuados
 - Escobillas, esponjas y guantes (para el lavado de las pencas)

3.3.2. *Monitoreo de muestras de agua*

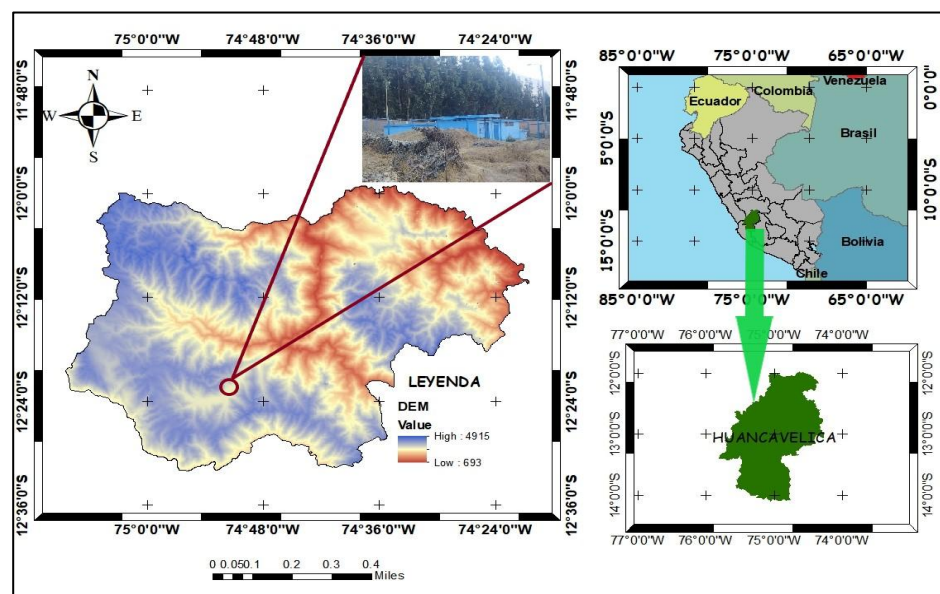
El monitoreo de la calidad del agua se realizó de manera puntual, siguiendo los lineamientos del Decreto Supremo N° 031-2010-SA, emitido por el Ministerio de Salud (MINSA) y el Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales del MINAM y la ANA. Este protocolo definió criterios técnicos para la recolección y análisis de muestras en cuerpos de agua que abastecen plantas de tratamiento de agua potable. En este estudio, el monitoreo se llevó a cabo en el río Viñas, cuya corriente desemboca en la PTAP de Pampas.

- Muestreo puntual: Se realizó un muestreo puntual en un punto estratégico del río Viñas al ingreso a la PTAP, el día 27 de febrero del 2025.
- Parámetros monitoreados: Se evaluaron turbiedad, pH, temperatura y conductividad, alineados con el protocolo y estándares peruanos.

- Preparación de equipos: Se utilizaron frascos limpios y esterilizados, así como equipos específicos para cada parámetro: turbidímetro, medidores portátiles de pH, temperatura y conductividad.
- Muestreo de turbiedad: Se tomó una muestra de agua en un frasco limpio de 1 litro, a una profundidad de 30 cm. La muestra se transportó al laboratorio y se midió la turbiedad en NTU.
- Muestreo de pH y temperatura: Se midieron in situ con medidores calibrados, sumergiendo los electrodos directamente en la muestra.
- Muestreo de conductividad: Se utilizó un multiparámetro portátil calibrado previamente para realizar la medición directamente en el cuerpo de agua.
- Muestreo para corridas experimentales: Se recolectaron 20 L de muestra en galones limpios y esterilizados, los cuales fueron cerrados herméticamente.
- Transporte y almacenamiento: Las muestras se transportaron bajo 4 °C y se procesaron dentro de 48 horas.
- Registro de condiciones ambientales: Se registraron hora, clima y otras variables al momento de la toma de muestras.

Figura 5

Mapa de ubicación de la toma de muestra de agua cruda de la PTAP



Fuente: Programa ArcGis versión 10.8, (2023).

3.3.3. *Obtención del floculante Opuntia ficus-indica*

Para la obtención del floculante se siguió el procedimiento de Acevedo y Huamán, (2021):

- Selección de pencas: Se seleccionaron pencas de 2 años a 3 años, sin signos de enfermedad, recolectadas en Izcuchaca, Huancavelica.
- Pesado: Las pencas fueron pesadas para control y balance de materia prima.
- Cepillado y lavado: Se emplearon escobillas y esponjas para remover suciedad y espinas.
- Extracción de espinas y pelado: Se usaron pinzas y bisturíes para pelar las pencas cuidadosamente.
- Picado: Se trozaron las pencas en cubos de 1 cm³.
- Extracción: Se mezclaron pencas y agua (1:2) y se calentó a ebullición por 15 minutos para extraer el mucílago.
- Filtración: Se dejó reposar 20 minutos y luego se filtró la solución con papel filtro adecuado.
- Coagulante natural: Se obtuvo una solución viscosa y transparente de mucílago fresco de nopal.
- Almacenamiento: Se almaceno en un envases limpio y hermético, preferentemente de vidrio, y se mantuvo en refrigeración a una temperatura de entre 4 °C y 8 °C para preservar sus propiedades floculantes y evitar su descomposición.

3.3.4. *Obtención de la bentonita como coagulante*

El proceso se inició con la identificación de un proveedor especializado, como Insumos Químicos Perú, seguido de la coordinación para su adquisición y entrega. Posteriormente, se verificaron las especificaciones técnicas del material para asegurar su conformidad con los requerimientos del estudio. Finalmente, el insumo fue almacenado en condiciones adecuadas hasta su utilización.

Especificaciones de la bentonita:

- Fórmula química: $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$

- Descripción del producto: Arcilla natural color beige
- Punto de fusión: Aprox. 1450 °C
- Densidad (a 20 °C): 55 Lbs/pies
- Gravedad específica: 2,45 – 2,55
- pH: 8 – 10 (5% suspensión acuosa)

Posteriormente, se preparó una suspensión añadiendo 10 g de bentonita en 1 L de agua, agitada durante 24 horas. A partir de esta solución, se aplicaron las dosis correspondientes, según Carrasquero et al., (2020).

3.3.5. *Tratamiento del agua cruda*

Se siguió el procedimiento descrito por Acevedo y Huamán, (2021) y Alsaeed et al., (2022).

- Las muestras de agua turbia fueron aforadas con la ayuda de una probeta graduada hasta 1 litro, garantizando que los cuatro vasos de precipitación contuvieran el mismo volumen, lo cual permitió verter dichas muestras en ellos de manera uniforme. Una vez que los vasos estuvieron correctamente posicionados en el equipo de prueba de jarras, se verificó que las paletas de agitación quedaran alineadas. Cuando tanto los vasos como las paletas estuvieron en su sitio, se dio inicio al proceso de agitación con el propósito de evitar la sedimentación de partículas.
- Durante el ensayo de prueba de jarras, se aplicaron cuatro dosis del coagulante natural bentonita (10 mL, 20 mL, 30 mL y 40 mL), las cuales fueron medidas con una probeta de 50 mL. Estas mismas proporciones se utilizaron también para el floculante natural *Opuntia ficus-indica*. Para asegurar precisión y evitar contaminación, las dosis fueron medidas utilizando probetas graduadas y estériles. Además, se procuró que la variación temporal al verter las seis dosis en cada jarra durante la etapa de agitación fuera mínima, garantizando uniformidad en el proceso experimental.
- Una vez preparados los vasos, se procedió con una mezcla rápida a 120 rpm durante un intervalo de tres minutos con el objetivo de homogeneizar la distribución del coagulante en el volumen total de

agua y favorecer el primer contacto entre las partículas suspendidas y el agente coagulante, permitiendo la desestabilización de las cargas. Posteriormente, se efectuó una mezcla lenta a 25 rpm durante 10 minutos, lo cual facilitó la colisión y unión de las partículas desestabilizadas, promoviendo la formación de flóculos de mayor tamaño y estabilidad sin romperlos.

- Finalmente, se dejó reposar el sistema durante 30 minutos para permitir la sedimentación por gravedad de los flóculos formados durante el proceso de coagulación-floculación.

3.4. Diseño de investigación

Se trabajó con un diseño experimental con un arreglo factorial de 4×4, el cual fue adecuado porque permitió evaluar de manera eficiente y sistemática los efectos individuales (variables principales) y combinados (interacción) de dos factores, cada uno con cuatro niveles, sobre el resultado.

En el estudio se consideraron dos variables:

- Variable 1: Dosis de bentonita (con cuatro niveles). Como se detalló en el punto 3.3.3, se preparó una solución de bentonita para su aplicación en los experimentos.
- Variable 2: Dosis de *Opuntia ficus-indica* (con cuatro niveles). Según lo descrito en el punto 3.3.2, se obtuvo el coagulante en estado líquido para su uso en el proceso experimental.

Este diseño redujo el número de experimentos necesarios en comparación con la evaluación de cada factor de manera independiente, como se ha realizado en otros estudios. El diseño factorial 4×4 generó 16 combinaciones posibles entre los niveles de ambos factores (dosis de bentonita y *Opuntia ficus-indica*), permitiendo una evaluación exhaustiva de los efectos principales y de las interacciones entre ellos, con un uso eficiente de los recursos disponibles.

En el presente estudio se optó por utilizar dos réplicas por tratamiento, decisión que se fundamenta en el principio de repetición descrito por Romaina (2012), quien establece que la repetición permite obtener una mayor precisión en la medición del efecto del tratamiento, además de proporcionar una estimación del

error experimental. Aunque el aumento en el número de réplicas puede mejorar la precisión estadística, este incremento tiene un límite práctico, ya que llega un punto en el cual el beneficio adicional en precisión no justifica el valor operativo que implica realizar más repeticiones. Por ello, la determinación del número adecuado de réplicas debe considerar el balance entre los recursos disponibles, las diferencias entre tratamientos y la variabilidad observada en campo.

Asimismo, el autor indica que, para estimar eficientemente el error experimental, se recomienda contar con al menos diez grados de libertad para dicho error, aunque no es necesario replicar hasta alcanzar más de veinte. En este estudio, el diseño estadístico permitió obtener 16 grados de libertad para el modelo y 15 grados de libertad para el error, lo cual cumple con creces esta recomendación metodológica. Por tanto, el uso de dos réplicas resulta estadísticamente válido, ya que garantiza una estimación confiable del error experimental sin incurrir en una sobrecarga de recursos. Esta decisión también se apoya en el criterio de que, cuando las diferencias entre tratamientos son claras y la variabilidad de los datos es moderada, un número limitado de réplicas puede ser suficiente para alcanzar conclusiones confiables.

Tabla 4

Niveles de las variables de estudio

Variables independientes	Niveles			
	1	2	3	4
Dosis de Bentonita (mL)	10	20	30	40
Dosis de <i>Opuntia ficus-indica</i> (mL)	10	20	30	40

Nota. Niveles de las variables de estudio de las dosis de bentonita y *Opuntia ficus-indica*.

Tabla 5

Diseño factorial 4×4

Dosis de Bentonita (mL)	Dosis de <i>Opuntia ficus-indica</i> (mL)
10	10
10	20
10	30
10	40
20	10
20	20
20	30

20	40
30	10
30	20
30	30
30	40
40	10
40	20
40	30
40	40

Nota. Diseño factorial 4x4 que genera las 16 combinaciones entre las dosis de bentonita y *Opuntia ficus-indica*.

3.5. Población, muestra y muestreo

3.5.1. Población

La población de estudio estará compuesta por las aguas del Río Viñas, el cual cuenta con un caudal considerable de 110 litros por segundo. Este río es la fuente vital que alimenta la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) de Pampas, ubicada en el Centro Poblado de Viñas, dentro del distrito de Pampas, en la provincia de Tayacaja, Departamento de Huancavelica, a una elevación de 3272 metros sobre el nivel del mar. Las coordenadas geográficas exactas de la planta son 12°24.35'43" S y 74°51.58'97" O, con coordenadas UTM 514544,12 E y 8628117,28 S. Estos datos geográficos y el caudal de agua son clave para comprender los desafíos del suministro de agua potable en esta región montañosa.

Figura 6

Planta de tratamiento de agua potable (PTAP)



Fuente: Vista de la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) del distrito de Pampas.

3.5.2. Muestra

La fórmula aplicada para poder conocer el total de muestra fue:

$$n = \frac{z^2 p q N}{e^2 (N - 1) + z^2 p q}$$

- n = Tamaño de muestra o cantidad de elementos a encuestar
- z = Nivel de confianza (95%)
- p = Probabilidad de que ocurra el evento (éxito)
- q = Probabilidad que no ocurra el evento ($q - 1$)
- e = Margen de error deseado
- N = Tamaño de la población

Nota: Cuando no hay antecedente de encuesta, p y q serán 50%

Entonces:

$$n = \frac{1,96^2 \times 0,95 \times 0,05 \times 110 \text{ L}}{0,086^2 (110 - 1) + 1,96^2 \times 0,05 \times 0,95}$$

$$n = 20,30 \text{ L} \approx 20\text{L}$$

Por lo tanto, se empleó 20 L de aguas crudas para el tratamiento.

3.6. Identificación y operacionalización de variables

3.6.1. Variable independiente

Variable 1: Dosis de coagulante bentonita

Dosis del coagulante: 10 mL, 20 mL, 30 mL y 40 mL.

Variable 2: Dosis de floculante natural de la *Opuntia ficus - indica*.

Dosis del floculante: 10 mL, 20 mL, 30 mL y 40 mL.

3.6.2. Variable dependiente

Variable 3: Parámetros fisicoquímicos.

Parámetros físico-químicos: Turbiedad, pH, Temperatura y Conductividad.

3.6.3. Operacionalización de variables

Tabla 6

Operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Sub dimensiones	Operación	
					Indicadores	Tipo Variable
Variable independiente 1 Dosis de Bentonita como coagulante natural	Al ser añadido al agua, la bentonita actúa como un coagulante, promoviendo la aglutinación de las partículas en suspensión y su posterior sedimentación, mejorando así la calidad del agua al reducir turbiedad, sólidos suspendidos y otros contaminantes. (Carrasquero et al., 2015)	Los resultados de la acción del coagulante se conseguirán variando las distintas dosis de tratamiento en las muestras recolectadas de la <i>PTAP – Pampas</i> (Samame, 2019).	Dosis de la bentonita	Dosis 10 mL Dosis 20 mL Dosis 30 mL Dosis 40 mL	mL del coagulante bentonita por litro de agua.	Numérica
Variable independiente 2 Dosis de <i>Opuntia ficus - indica</i> como floculante natural	Al ser añadido al agua, facilita la formación de flóculos, reduciendo la turbiedad y mejorando la calidad del agua. Este floculante natural es biodegradable, económico y sostenible, lo que lo convierte en una alternativa eficiente y amigable con el medio ambiente (Acevedo y Huaman, 2021).	Los resultados de la acción del floculante se conseguirán variando las distintas dosis de tratamiento en las muestras recolectadas de la <i>PTAP – Pampas</i> (Samame, 2019).	Dosis de la <i>Opuntia ficus - indica</i>	Dosis 10 mL Dosis 20 mL Dosis 30 mL Dosis 40 mL	mL del floculante <i>Opuntia ficus - indica</i> por litro de agua.	Numérica
Variables dependientes Parámetros físico-químicos	Los parámetros físico-químicos del agua son indicadores esenciales para evaluar su calidad, determinar el tipo de tratamiento necesario y garantizar que cumpla con los estándares de seguridad y potabilidad. Su monitoreo regular permite asegurar que el agua sea apta para el consumo humano y otros usos domésticos. (Acevedo y Huaman, 2021).	La disminución de contaminantes de las muestras recolectadas de la <i>PTAP – Pampas</i> , se determinará en función de los parámetros físicos y químicos. Además, serán comparadas con el Decreto supremo 031-2010. (Samame, 2019).	Análisis físicoquímico	Turbiedad pH Temperatura Conductividad	NTU Unidad de pH °C µS/cm	Numérica

3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.7.1. Instrumentos de recolección de datos

- Cadena de custodia: Durante los ensayos con el equipo de prueba de jarras, se utilizaron fichas diseñadas según el formato de dosificación óptima de coagulantes para registrar y organizar los datos obtenidos (Acevedo y Huaman, 2021).
- Equipos de laboratorio: Los equipos de laboratorio fueron verificados para asegurar que contaran con su respectiva calibración y certificación de funcionamiento vigente. Esta medida fue esencial para garantizar la precisión de las mediciones y la confiabilidad de los datos generados, asegurando así la calidad y consistencia de los resultados obtenidos a lo largo del estudio (Acevedo y Huaman, 2021).
- Equipo de prueba de jarras: Se utilizó un equipo de prueba de jarras de la marca Velp Científica, el cual cuenta con cuatro posiciones de agitación con velocidad uniforme, panel posterior iluminado y regulación electrónica de velocidad desde 10 hasta 300 rpm. Este equipo permitió realizar pruebas de coagulación-floculación de forma controlada y precisa, facilitando la evaluación del comportamiento de los sólidos suspendidos y coloides mediante observación óptica basada en la transmisión de luz (Acevedo y Huaman, 2021).
- Turbidímetro: Este equipo permitió medir con precisión las partículas suspendidas en el agua, reportando los resultados en unidades de turbiedad (NTU). Se utilizó el turbidímetro HANNA HI98703, el cual cumple los requisitos del Método 180.1 de la USEPA para aguas residuales, así como del Método 2130 B para agua potable. El instrumento cuenta con un modo de lectura conforme a los estándares de la EPA, lo que garantiza que las mediciones se ajusten a los criterios regulatorios establecidos. Destaca por su alta precisión y sensibilidad, especialmente en niveles de turbiedad muy bajos, lo que lo convierte en una herramienta confiable para el análisis de la calidad del agua (Acevedo y Huaman, 2021).
- Multiparámetro: Se utilizó el multiparámetro portátil HANNA HI 9812-5 para la evaluación de pH, conductividad eléctrica, sólidos

disueltos totales (TDS) y temperatura en campo. Este equipo permitió realizar mediciones simultáneas y en tiempo real directamente en el punto de muestreo, lo que facilitó un análisis eficiente y preciso de las condiciones fisicoquímicas del agua durante el monitoreo. (Acevedo y Huaman, 2021).

3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

3.8.1. Técnicas de análisis de datos

Para la revisión y análisis de los datos, se aplicaron de manera coherente métodos estadísticos y herramientas computacionales orientadas a evaluar la eficacia de los coagulantes-floculantes empleados. En una primera etapa, los registros fueron organizados y procesados en hojas de cálculo y software estadístico, lo que permitió optimizar su análisis. Los datos fueron descritos mediante cálculos de medias, desviaciones estándar y porcentajes, facilitando una presentación clara de los resultados obtenidos.

Antes de aplicar pruebas comparativas, se realizó una prueba de normalidad con el objetivo de determinar el tipo de análisis estadístico más adecuado. En función de los resultados, se aplicó el análisis de varianza (ANOVA) para los conjuntos de datos que presentaban distribución normal, y la prueba de Kruskal-Wallis como alternativa no paramétrica en aquellos casos donde no se cumplían los supuestos de normalidad.

Adicionalmente, se utilizó la prueba t de Student para comparar los resultados obtenidos entre las épocas de alta y baja turbidez, con el fin de establecer si existían diferencias estadísticamente significativas entre ambos periodos.

Estas pruebas permitieron garantizar la validez científica y la precisión de los resultados obtenidos en el estudio.

3.8.2. Procesamiento de análisis de datos

El análisis de datos se realizó utilizando el software estadístico MINITAB 18, con el objetivo de obtener descripciones detalladas de las variables,

medidas de tendencia central, de dispersión y representaciones gráficas que facilitaran la interpretación de los resultados. Todos los datos recolectados, incluidas sus réplicas, fueron sistemáticamente organizados en hojas de cálculo de Microsoft Excel, lo que permitió una manipulación estructurada, verificación cruzada y posterior importación a MINITAB para su procesamiento estadístico (Iannacone y Molano, 2018).

Inicialmente, se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, adecuada para muestras menores de 50 observaciones, con el fin de verificar si los datos seguían una distribución normal, condición indispensable para el uso de pruebas paramétricas como el Análisis de Varianza (ANOVA). Cuando los datos cumplieron con el supuesto de normalidad, se procedió con el ANOVA para comparar las medias entre tratamientos y evaluar diferencias significativas. En los casos donde los datos no presentaron una distribución normal, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, la cual permite comparar las medianas entre múltiples grupos sin requerir normalidad, garantizando así la validez del análisis en condiciones no ideales.

Además, se aplicó la prueba t de Student para comparar los resultados obtenidos entre las épocas de alta y baja turbidez, con el fin de determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre ambos periodos. Esta prueba fue seleccionada por su capacidad para contrastar dos grupos independientes cuando los datos cumplen los supuestos de normalidad e igualdad de varianzas.

En conjunto, la aplicación de estas pruebas estadísticas permitió asegurar la rigurosidad y validez de los resultados obtenidos en el estudio.

3.8.3. Aspectos éticos y regulatorios

La investigación se basó en los principios éticos de la Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo, y se muestra a favor del cumplimiento de los principios, preceptos y normas que se especifican y/o señalan en el código de ética, lo cual significa que la investigación será realizada de forma ética y responsable

- **Consentimiento Informado:** Antes de realizar pruebas en fuentes de agua de consumo humano, se obtuvo el consentimiento informado de los propietarios de las fuentes y de las personas que utilizan esa agua. Se les explicó claramente el propósito del estudio, los procedimientos involucrados y cualquier riesgo potencial. Se procedió con la investigación tras el consentimiento voluntario y consciente de todas las partes involucradas.
- **Cumplimiento Normativo:** Se verificó y cumplió con todas las regulaciones y normativas locales y nacionales relacionadas con la calidad del agua y la investigación científica. Incluyendo los permisos necesarios de las autoridades locales o agencias reguladoras antes de realizar las pruebas.
- **Ética de la Investigación:** Durante la realización de las pruebas, se aseguró los altos estándares éticos. Garantizando la confidencialidad de los datos recopilados y el respeto a la privacidad de las personas involucradas. Además, evitando cualquier forma de manipulación de datos o resultados.
- **Seguridad de los Participantes:** En el manejo de productos químicos para llevar a cabo las pruebas de coagulación-floculación, se siguió estrictamente los protocolos de seguridad, con equipos de protección personal (EPP) cuando se participó en la manipulación de sustancias químicas tomando las medidas para evitar cualquier exposición no deseada.
- **Divulgación de Conflictos de Interés:** En los investigadores no se cuenta con una afiliación institucional, intereses financieros o cualquier otro conflicto de interés que pueda influir en los resultados de la investigación.
- **Ética en la Publicación:** Para la presentación de los resultados de la investigación en publicaciones científicas o informes, se proporcionó una atribución adecuada a las fuentes con datos honesta y precisa, sin sesgo o manipulación.

IV. Resultados

4.1. Caracterización de las aguas crudas

Se tomaron muestras del río Viñas, fuente vital que abastece a la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) de Pampas, ubicada en el centro poblado de Viñas, distrito de Pampas, provincia de Tayacaja, departamento de Huancavelica. Las muestras fueron recolectadas durante las temporadas de alta turbiedad y baja turbiedad, obteniéndose los resultados que se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 7

Parámetros iniciales del agua cruda del río Viñas

Parámetro	Unidad	Temporada		Normativa D.S. 031-2010- SA
		Alta turbiedad	Baja turbiedad	
pH	Unidad de pH	7,15	7	6,5 a 8,5
Temperatura	°C	13,3	13,1	-
Conductividad	µS/cm	85,4	60	1500
Turbiedad	NTU	385	35	5
SST	mg/L	374	14	1000

Los parámetros del agua cruda del río Viñas presentan variaciones significativas entre las temporadas de alta turbiedad (época de lluvias) y baja turbiedad (época seca), lo que representa desafíos diferenciados para su tratamiento, en función del cumplimiento del Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano (D.S. N.º 031-2010-SA).

En cuanto al pH, ambos periodos registran valores dentro del rango establecido para fuentes de agua (6,5 a 8,5), con 7,15 en alta turbiedad y 7,00 en baja turbiedad. Estos valores neutros favorecen procesos clave como la coagulación y la desinfección, ya que optimizan la acción de los productos químicos utilizados en las plantas de tratamiento.

La temperatura del agua se mantiene baja en ambas estaciones: 13,3 °C en alta turbiedad y 13,1 °C en baja turbiedad, lo cual es característico de las zonas altoandinas. Aunque el reglamento no establece un límite específico para este

parámetro, es importante considerar que las bajas temperaturas pueden ralentizar las reacciones químicas y biológicas, como la desinfección, lo que requiere ajustes operacionales para mantener la eficiencia del tratamiento.

Respecto a la conductividad eléctrica, los valores son bajos: 85,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en alta turbiedad y 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en baja turbiedad, lo que indica un agua ligeramente blanda. Esta condición, aunque no representa un riesgo por dureza, sugiere una baja concentración de sales disueltas, lo cual puede afectar la eficiencia de la coagulación y requerir una dosificación ajustada de coagulantes, sobre todo en alta turbiedad.

El parámetro más crítico es la turbiedad, que muestra una diferencia drástica entre temporadas: 385 NTU durante la alta turbiedad y 35 NTU en baja turbiedad. Ambos valores superan ampliamente el límite máximo de 5 NTU establecido para agua tratada, siendo especialmente preocupante en época de lluvias. La alta turbiedad implica una elevada carga de sedimentos, lo que exige sistemas reforzados de coagulación, sedimentación y filtración. En cambio, durante la baja turbiedad, los niveles de turbiedad son más manejables con tratamientos convencionales.

En cuanto a los sólidos suspendidos totales (SST), se observa una marcada variación: 374 mg/L en alta turbiedad y 14 mg/L en baja turbiedad. Aunque este parámetro no está normado para agua cruda, su concentración incide directamente en la operación de la planta. En temporada de alta turbiedad, la elevada presencia de sólidos demanda pretratamientos como desarenadores para evitar obstrucciones y daños en los equipos. Por el contrario, en baja turbiedad, los bajos niveles de SST permiten una operación más eficiente con menores requerimientos técnicos.

4.2. Resultados del tratamiento de agua en alta turbiedad

Se trató el agua cruda del río Viñas en alta turbiedad mediante el uso de bentonita como coagulante y *Opuntia ficus-indica* como floculante natural. Los resultados obtenidos tras el tratamiento se presentan de manera organizada en la siguiente tabla.

Tabla 8

Resultados del tratamiento mediante coagulación-floculación de aguas en alta turbiedad

Dosis de Bentonita (mL)	Dosis de <i>Opuntia ficus-indica</i> (mL)	Replica I					Replica II					Desviación estándar Turbiedad	Desviación estándar SST
		Temperatura (°C)	pH	Conductividad eléctrica (μS/cm)	Turbiedad (NTU)	SST (mg/L)	Temperatura (°C)	pH	Conductividad eléctrica (μS/cm)	Turbiedad (NTU)	SST (mg/L)		
0	0	13,30	7,15	85,40	385,00	374,00	14,00	7,07	89,10	352,00	368,00	-	-
10	10	13,20	7,45	154,00	20,90	7,00	14,00	7,31	157,00	15,90	6,00	3,54	0,71
10	20	13,20	6,25	279,00	37,20	15,00	13,80	6,16	281,00	30,60	13,00	4,67	1,41
10	30	13,20	6,04	346,00	17,90	6,00	13,90	6,08	344,00	12,80	5,00	3,61	0,71
10	40	13,20	5,96	361,00	15,20	5,00	13,90	5,85	367,00	12,90	4,00	1,63	0,71
20	10	13,10	7,37	192,00	25,90	10,00	14,00	7,32	195,00	21,10	8,00	3,39	1,41
20	20	13,10	6,18	293,00	15,30	5,00	14,00	6,05	291,00	13,00	5,00	1,63	0,00
20	30	13,10	6,02	355,00	15,10	5,00	14,00	5,99	359,00	12,80	4,00	1,63	0,71
20	40	13,10	5,75	384,00	13,90	5,00	13,90	5,68	388,00	11,70	4,00	1,56	0,71
30	10	13,30	7,16	218,00	32,80	13,00	13,80	7,11	214,00	27,50	11,00	3,75	1,41
30	20	13,30	6,11	321,00	27,70	10,00	13,90	6,07	324,00	24,10	8,00	2,55	1,41
30	30	13,20	5,90	360,00	4,90	3,00	14,00	5,14	360,00	4,40	2,00	0,35	0,71
30	40	13,20	5,69	404,00	12,00	4,00	14,00	5,22	411,00	9,20	3,00	1,98	0,71
40	10	13,10	6,61	246,00	23,20	8,00	14,00	6,50	243,00	19,70	6,00	2,47	1,41
40	20	13,10	6,07	318,00	18,40	5,00	13,80	6,02	317,00	14,10	4,00	3,04	0,71
40	30	13,20	5,84	371,00	11,10	4,00	13,80	5,70	379,00	10,50	4,00	0,42	0,00
40	40	13,30	5,61	424,00	7,30	3,00	13,90	5,53	420,00	7,20	2,00	0,07	0,71

Se evaluó el tratamiento de las aguas crudas del río Viñas mediante un proceso de coagulación-floculación utilizando bentonita como coagulante y *Opuntia ficus-indica* como floculante natural. A lo largo del ensayo, el pH presentó una ligera tendencia a la disminución conforme aumentaba la dosis del floculante, manteniéndose entre valores neutros y levemente ácidos. La temperatura se mantuvo estable entre 13,1 °C y 14 °C, mientras que la conductividad eléctrica aumentó proporcionalmente con la dosis de coagulante y floculante, lo que indica una mayor concentración de partículas disueltas en el sistema

Los mejores resultados en cuanto a la reducción de turbiedad y sólidos suspendidos totales (SST) se obtuvieron con la combinación de 30 mL de bentonita y 30 mL de *Opuntia ficus-indica*. En esta condición, la turbiedad fue reducida a 4,9 NTU en la réplica I y a 4,4 NTU en la réplica II, mientras que los SST se redujeron a 3 mg/L y 2 mg/L, respectivamente. Estas cifras representan las concentraciones más bajas registradas en toda la prueba, acompañadas además por desviaciones estándar mínimas, lo que evidencia una alta eficiencia y reproducibilidad del tratamiento bajo esta dosis intermedia.

En conjunto, los resultados demuestran que no siempre las dosis más altas de coagulante y floculante son las más eficaces. La combinación de 30 mL de bentonita y 30 mL de floculante natural fue suficiente para alcanzar una alta eficiencia en la remoción de turbiedad y sólidos, sin alterar significativamente otras características fisicoquímicas del agua. Esta estrategia representa una alternativa efectiva y sostenible para el tratamiento de aguas naturales, al aprovechar materiales económicos y de origen natural que minimizan el impacto ambiental.

La desviación estándar fue utilizada como un indicador estadístico para evaluar la variabilidad entre las réplicas de cada tratamiento. Valores bajos de desviación estándar, como los observados en las combinaciones de 30 mL–30 mL y 40 mL–30 mL, reflejan una mayor consistencia en los resultados obtenidos, lo cual es fundamental para validar la confiabilidad del método. Por el contrario, desviaciones más altas sugieren variabilidad en la eficiencia del tratamiento, lo cual puede estar relacionado con factores como una distribución no homogénea del floculante o fluctuaciones en las características del agua.

4.2.1. Promedio de resultados del tratamiento del agua en alta turbiedad

Se determinó el promedio entre ambas réplicas para poder obtener resultados más representativos y reducir el margen de error asociado con la variabilidad experimental. Este enfoque permite asegurar que los valores obtenidos sean consistentes y fiables, proporcionando una visión más precisa de la eficiencia del tratamiento. Estos resultados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 9*Resultados promedio de las aguas tratadas pro coagulación-floculación*

Dosis de Bentonita (mL)	Dosis de <i>Opuntia ficus-indica</i> (MI)	Temperatura (°C)	pH	Conductividad eléctrica (μS/cm)	Turbiedad (NTU)	SST (mg/L)
10	10	13,60	7,38	155,50	18,40	6,50
10	20	13,50	6,21	280,00	33,90	14,00
10	30	13,55	6,06	345,00	15,35	5,50
10	40	13,55	5,91	364,00	14,05	4,50
20	10	13,55	7,35	193,50	23,50	9,00
20	20	13,55	6,12	292,00	14,15	5,00
20	30	13,55	6,01	357,00	13,95	4,50
20	40	13,50	5,72	386,00	12,80	4,50
30	10	13,55	7,14	216,00	30,15	12,00
30	20	13,60	6,09	322,50	25,90	9,00
30	30	13,60	5,52	360,00	4,65	2,50
30	40	13,60	5,46	407,50	10,60	3,50
40	10	13,55	6,56	244,50	21,45	7,00
40	20	13,45	6,05	317,50	16,25	4,50
40	30	13,50	5,77	375,00	10,80	4,00
40	40	13,60	5,57	422,00	7,25	2,50

Los resultados de la tabla 9 según Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano (D.S. N.º 031-2010-SA) presenta las siguientes interpretaciones:

- pH: La normativa peruana establece que el pH del agua potable debe estar entre 6,5 y 8,5. Los resultados del tratamiento muestran que el pH en todas las muestras tratadas se encuentra dentro de este rango (entre 5,46 y 7,38). Sin embargo, algunos tratamientos con dosis más altas de *Opuntia ficus-indica* presentan un pH ligeramente más bajo, lo que puede estar relacionado con la acidificación natural de la mezcla durante el proceso de coagulación-floculación. Estos resultados indican que, en general, el tratamiento mantuvo el pH dentro de límites

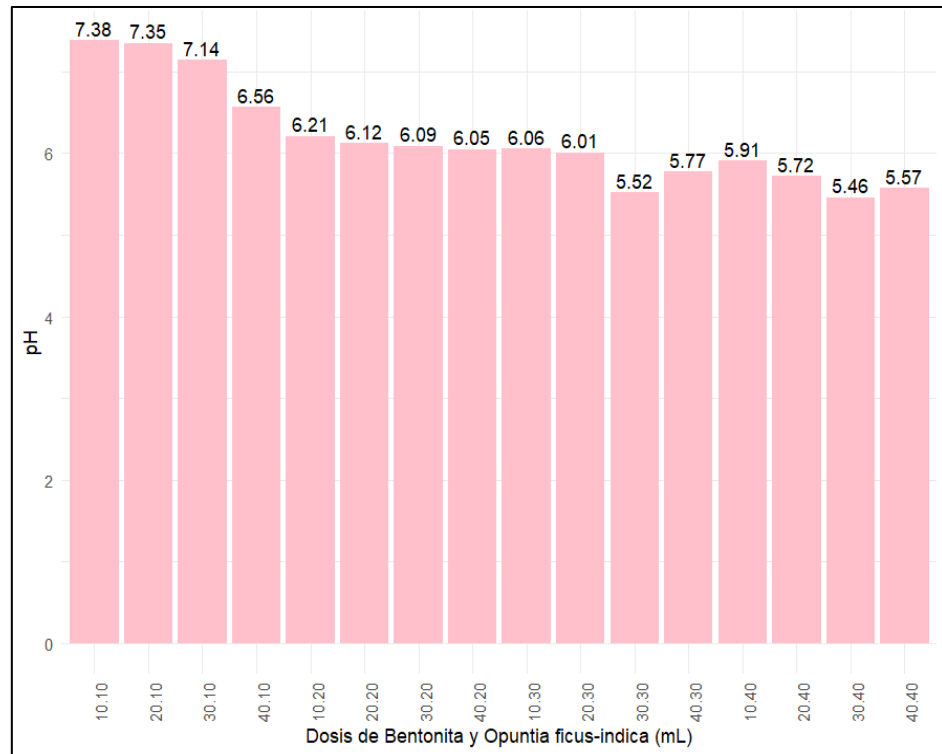
adecuados, lo que favorece la efectividad de los procesos de coagulación y desinfección.

- **Temperatura:** La temperatura del agua tratada en todos los tratamientos se mantuvo estable, con un rango entre 13,45°C y 13,60°C, lo cual es adecuado para los procesos de coagulación-floculación. Aunque no existe un límite específico para la temperatura en la normativa, la estabilidad térmica de las muestras es importante para asegurar que no se vean afectadas las reacciones químicas involucradas en el tratamiento.
- **Conductividad eléctrica:** La conductividad eléctrica, que refleja la cantidad de sales disueltas en el agua, tiene un límite máximo de 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ según la normativa. Los valores obtenidos en todos los tratamientos (entre 155,50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 422,00 $\mu\text{S}/\text{cm}$) se encuentran significativamente por debajo de este límite, lo que sugiere que el tratamiento no está contribuyendo a una excesiva acumulación de sales disueltas. Esto es una señal positiva de que los agentes utilizados en el proceso no están alterando la calidad iónica del agua de manera desfavorable.
- **Sólidos Suspendidos Totales (SST):** Aunque la normativa no establece un límite específico para los SST, los valores obtenidos en los tratamientos (entre 2,50 mg/L y 14,00 mg/L) indican que el tratamiento fue efectivo en reducir los SST, aunque algunos tratamientos, particularmente con dosis más bajas de coagulante, presentan niveles de SST relativamente altos.
- En relación con la turbiedad, uno de los parámetros clave en la calidad del agua para consumo humano, la normativa peruana establece que el valor máximo permitido es de 5 NTU. A partir de los resultados obtenidos, se observó que el tratamiento con 30 mL de Bentonita y 30 mL de *Opuntia ficus-indica* fue el más efectivo, logrando reducir la turbiedad a 4,65 NTU, lo que cumple con el límite establecido por la normativa. Este tratamiento mostró ser el más eficiente en la remoción de partículas suspendidas, obteniendo una turbiedad inferior a 5 NTU,

lo cual es un indicio de que los procesos de coagulación y floculación fueron altamente efectivos.

Figura 7

pH final después del tratamiento en alta turbiedad

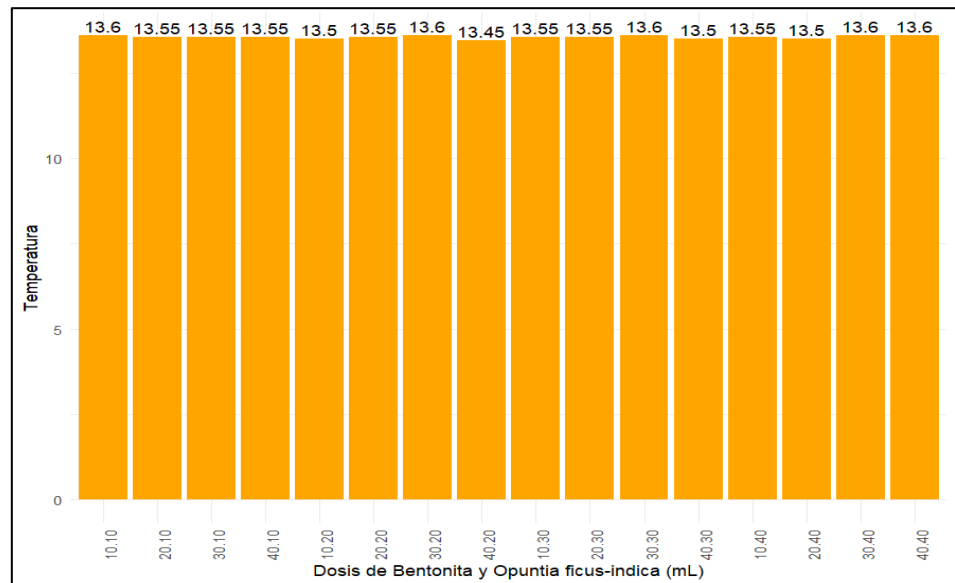


La figura 7 muestra que a medida que aumenta la dosis de bentonita y *Opuntia ficus-indica* utilizada para tratar el agua del río Viñas, el pH del agua generalmente disminuye desde un valor inicial de 7,15. A dosis más bajas (p. ej., 10:10, 20:10, 30:10 mL de bentonita: *Opuntia ficus-indica*), el pH se mantiene relativamente cerca del valor inicial, que oscila entre 7,14 y 7,38.

Sin embargo, con dosis más altas tanto de coagulante como de floculante (p. ej., 40 mL:10 mL, 40 mL:20 mL, 40 mL:30 mL, 40 mL: 40 mL), el pH cae consistentemente a un rango más ácido, entre aproximadamente 5,46 y 6,56. Esto indica que el proceso de tratamiento con bentonita y *Opuntia ficus-indica* tiende a disminuir el pH del agua del río, y este efecto se hace más pronunciado a concentraciones más altas de los agentes de tratamiento.

Figura 8

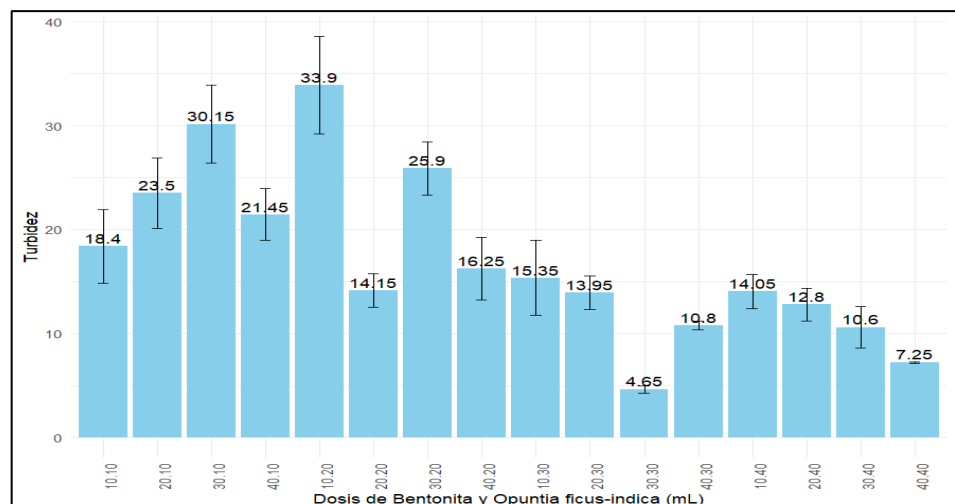
Temperatura final después del tratamiento en alta turbiedad



En general, la figura 8 indica que la temperatura del agua se mantiene relativamente estable en todas las dosis probadas. Los valores de temperatura fluctúan dentro de un rango estrecho, principalmente entre 13,5 °C y 13,6 °C, con una ligera caída a 13,45 °C en la dosis 40:20. Esto sugiere que la aplicación de bentonita como coagulante y *Opuntia ficus-indica* como floculante, en los rangos de concentración probados, no altera significativamente la temperatura del agua tratada del río.

Figura 9

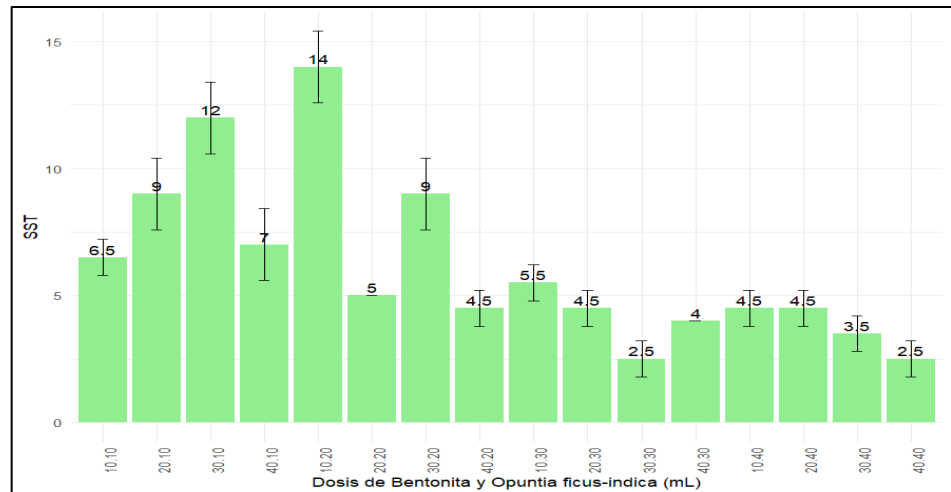
Turbiedad final después del tratamiento en alta turbiedad



Partiendo de una turbiedad inicial de 385 NTU, la figura 9 demuestra claramente una reducción significativa de la turbiedad en todas las dosis de tratamiento. Dosis más bajas (p. ej., 10 mL:10 mL, 20 mL:10 mL, 30 mL:10 mL, 40 mL:10 mL) resultan en valores de turbiedad que oscilan entre 18,4 NTU y 33,9 NTU. A medida que la proporción de *Opuntia ficus-indica* aumenta en la dosis (p. ej., comparando 10 mL:10 mL con 10 mL:20 mL, o 20 mL:10 mL con 20 mL:20 mL), generalmente se observa una disminución adicional en la turbiedad. Los valores de turbiedad más bajos, que indican la eliminación más efectiva de partículas suspendidas, se logran con proporciones más altas de *Opuntia ficus-indica*, particularmente en las dosis de 30 mL:30 mL y 40 mL:40 mL, lo que resulta en niveles de turbiedad de 4,65 NTU y 7,25 NTU, respectivamente. Esta tendencia sugiere que *Opuntia ficus-indica* juega un papel crucial en la floculación y sedimentación de partículas que causan turbiedad, y su efectividad mejora a concentraciones más altas en relación con la bentonita dentro de los rangos probados.

Figura 10

SST final después del tratamiento mediante coagulación-floculación



La figura 10 muestra que a dosis más bajas de bentonita en relación con la *Opuntia ficus-indica*, los valores de SST varían de 6,5 mg/L a 14 mg/L. En particular, el nivel más alto de SST se observa en la dosis de 40 mL:10 mL. A medida que aumenta la proporción de *Opuntia ficus-indica* en el tratamiento, hay una tendencia general hacia concentraciones más bajas

de SST. La reducción más significativa de la SST se logra con dosis más altas y equilibradas de bentonita y *Opuntia ficus-indica*, especialmente a partir de la dosis de 30 mL:30 mL, donde los niveles de SST caen consistentemente por debajo de 5 mg/L, alcanzando un mínimo de 2,5 mg/L. Esto sugiere que una proporción equilibrada o mayor de *Opuntia ficus-indica* y bentonita es más eficaz para eliminar los sólidos en suspensión del agua del río que los tratamientos con una proporción menor del floculante natural y coagulante.

4.2.2. Porcentaje de remoción de turbiedad y SST en alta turbiedad

Para el cálculo del porcentaje de remoción, se empleó la siguiente ecuación:

$$\% \text{Remoción} = \frac{\text{Conc. inicial} - \text{Conc. final}}{\text{Conc. inicial}} \times 100$$

Tabla 10*Porcentaje de remoción de turbiedad y SST en alta turbiedad*

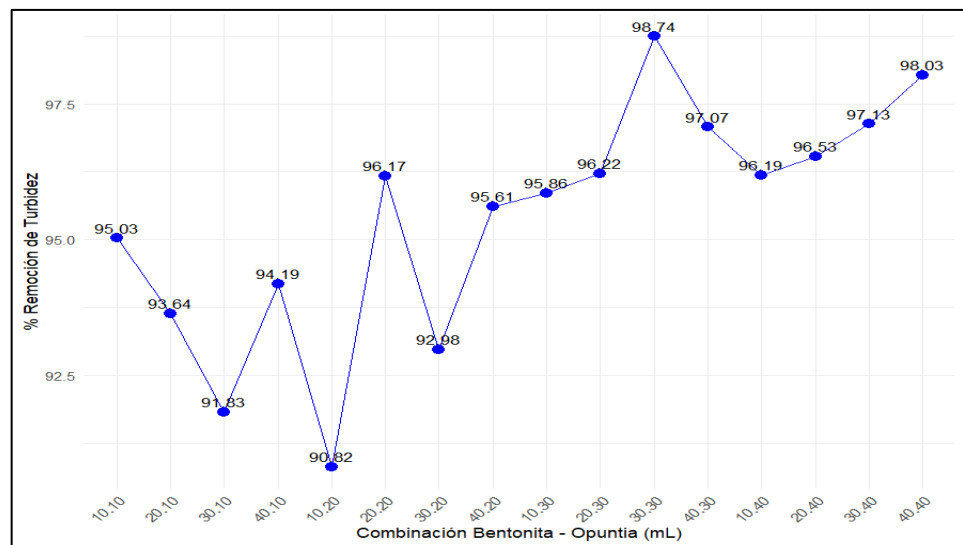
Dosis de Bentonita (mL)	Dosis de <i>Opuntia ficus-indica</i> (mL)	Replica I		Replica II		% promedio de remoción de turbiedad	% promedio de SST
		% remoción de turbiedad	%remoción de SST	% remoción de turbiedad	%remoción de SST		
10	10	94,57	98,13	95,48	98,37	95,03	98,25
10	20	90,34	95,99	91,31	96,47	90,82	96,23
10	30	95,35	98,40	96,36	98,64	95,86	98,52
10	40	96,05	98,66	96,34	98,91	96,19	98,79
20	10	93,27	97,33	94,01	97,83	93,64	97,58
20	20	96,03	98,66	96,31	98,64	96,17	98,65
20	30	96,08	98,66	96,36	98,91	96,22	98,79
20	40	96,39	98,66	96,68	98,91	96,53	98,79
30	10	91,48	96,52	92,19	97,01	91,83	96,77
30	20	92,81	97,33	93,15	97,83	92,98	97,58
30	30	98,73	99,20	98,75	99,46	98,74	99,33
30	40	96,88	98,93	97,39	99,18	97,13	99,06
40	10	93,97	97,86	94,40	98,37	94,19	98,12
40	20	95,22	98,66	95,99	98,91	95,61	98,79
40	30	97,12	98,93	97,02	98,91	97,07	98,92
40	40	98,10	99,20	97,95	99,46	98,03	99,33

La Tabla 10 muestra los porcentajes de remoción de turbiedad y sólidos suspendidos totales (SST) en función de diferentes combinaciones de dosis de bentonita y extracto de *Opuntia ficus-indica*. En general, se observa una alta eficiencia de remoción en todos los tratamientos, con porcentajes superiores al 90 % para la turbiedad y al 95 % para SST. Destacan las combinaciones de mayores dosis (30 mL – 40 mL y 40 mL – 40 mL), que lograron eficiencias máximas del 98,74 % en turbiedad y 99,33 % en SST, indicando una sinergia positiva entre ambos coagulantes. En particular, la dosis de 30 mL de bentonita con 30 mL de *Opuntia* resultó ser la más eficiente, alcanzando la mayor remoción de turbiedad y SST.

Asimismo, dosis intermedias como 20 mL – 30 mL y 20 mL – 40 mL también demostraron eficiencias elevadas y constantes, lo que sugiere que no es estrictamente necesario usar las dosis máximas para obtener buenos resultados. Por otro lado, las dosis más bajas, como 10 mL – 10 mL y 10 mL – 20 mL, si bien presentaron buenos niveles de remoción (más del 90 %), fueron ligeramente inferiores en comparación con las combinaciones de mayor concentración. Esto evidencia que tanto la bentonita como el extracto de *Opuntia* contribuyen significativamente al proceso de coagulación–floculación, y que su efectividad aumenta con la dosis, aunque con una posible tendencia a la saturación en las dosis más altas.

Figura 11

Porcentaje de remoción de turbiedad – alta turbiedad

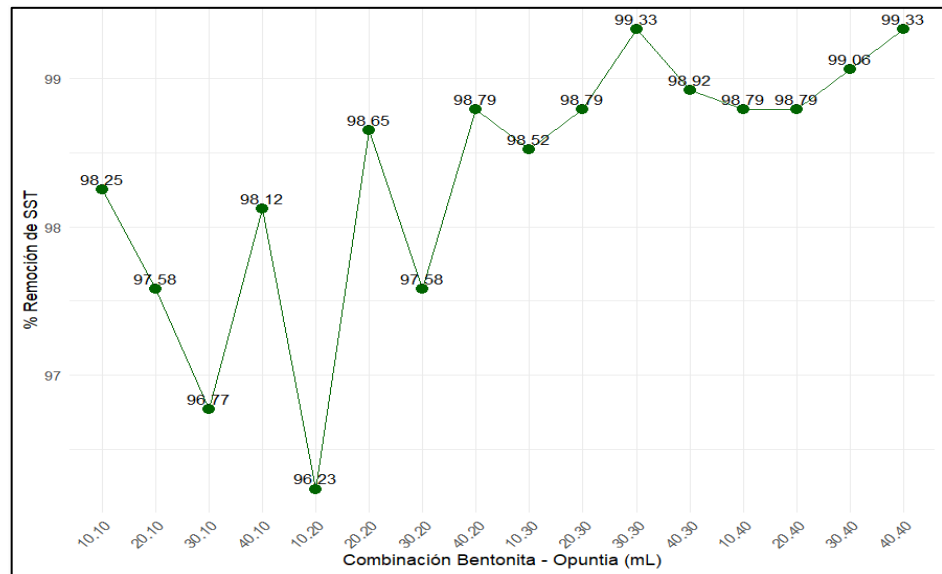


La Figura 11 muestra que, en todas las combinaciones analizadas, se logra una alta remoción de turbiedad, con valores que oscilan entre aproximadamente el 90,82 % y el 98,74 %. Con dosis más bajas y no balanceadas, la eficiencia de remoción varía entre el 91,83 % y el 95,03 %. La menor eficiencia (90,82 %) se registra con la combinación de 10 mL de bentonita y 20 mL de *Opuntia ficus-indica*, lo que indica que un aumento en la cantidad de floculante sin un ajuste correspondiente del coagulante no necesariamente mejora el rendimiento del tratamiento. A medida que las dosis se equilibran o se incrementa la cantidad total de

ambos insumos, se observa una mejora general en la remoción de turbiedad. La mayor eficiencia se alcanza con la dosis de 30 mL:30 mL, con un 98,74 % de remoción, mientras que combinaciones como 30:20, 40:30 y 40:40 también superan el 97 %. Estos resultados sugieren que dosis proporcionales o elevadas de bentonita y *Opuntia ficus-indica* ofrecen un efecto más eficaz en la reducción de turbiedad del agua del río.

Figura 12

Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales – alta turbiedad



La Figura 12 evidencia una alta eficiencia en la eliminación de sólidos suspendidos totales (SST) en todas las combinaciones analizadas, con porcentajes que varían entre 96,23 % y 99,33 %. Las dosis más bajas y desequilibradas, como la de 10:20 mL, presentan las menores eficiencias. En cambio, al emplear dosis más equilibradas o con mayor proporción de *Opuntia ficus-indica*, los porcentajes de remoción aumentan y se estabilizan en niveles superiores al 98 %. Las combinaciones de 30:30 mL y 40:40 mL alcanzan el mayor porcentaje de eliminación (99,33 %), lo que indica que una dosificación balanceada y adecuada es determinante para maximizar la eficacia del tratamiento. Estos resultados confirman que el uso conjunto de bentonita y *Opuntia ficus-indica*, en proporciones adecuadas, representa una estrategia efectiva para remover SST del agua del río, siendo especialmente útil en condiciones de alta turbidez.

4.3. Resultados del tratamiento de agua en baja turbiedad

Se trató el agua cruda del río Viñas en baja turbiedad mediante el uso de bentonita como coagulante y *Opuntia ficus-indica* como floculante natural. Los resultados obtenidos tras el tratamiento se presentan de manera organizada en la siguiente tabla.

Tabla 11

Resultados del tratamiento de agua en baja turbiedad mediante coagulación-floculación

Dosis de Bentonita (mL)	Dosis de <i>Opuntia ficus-indica</i> (mL)	Réplica I					Réplica II					Desviación estándar Turbiedad	Desviación estándar SST
		pH	Temperatura (°C)	Conductividad eléctrica (μS/cm)	Turbiedad (NTU)	SST (mg/L)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad eléctrica (μS/cm)	Turbiedad (NTU)	SST (mg/L)		
0	0	7	13,10	60,00	35,00	14,00	7,06	13,70	55,00	39,00	15,00	-	-
10	10	6,95	13,50	135,00	4,37	3,00	6,92	14,10	133,00	4,78	4,00	0,29	0,71
10	20	6,54	13,40	254,00	1,62	2,00	6,66	13,90	257,00	1,75	1,00	0,09	0,71
10	30	5,99	13,40	326,00	3,94	3,00	5,93	14,00	320,00	4,38	2,00	0,31	0,71
10	40	5,08	13,40	344,00	1,64	2,00	5,07	13,90	341,00	2,01	2,00	0,26	0,00
20	10	6,90	13,30	176,00	5,79	3,00	7,00	14,00	179,00	6,32	4,00	0,37	0,71
20	20	6,11	13,30	278,00	3,77	2,00	6,24	13,90	270,00	2,88	1,00	0,63	0,71
20	30	5,43	13,50	333,00	2,68	2,00	5,46	14,10	321,00	2,39	1,00	0,21	0,71
20	40	5,16	13,40	361,00	1,49	2,00	5,27	14,00	365,00	2,46	1,00	0,69	0,71
30	10	6,84	13,40	201,00	8,11	4,00	6,80	14,00	194,00	8,90	3,00	0,56	0,71
30	20	6,05	13,50	307,00	6,80	1,00	6,11	13,00	301,00	7,54	3,00	0,52	1,41
30	30	5,72	13,30	345,00	0,69	1,00	5,79	13,90	349,00	0,64	1,00	0,04	0,00
30	40	5,36	13,40	392,00	1,86	1,00	5,30	13,90	384,00	3,09	2,00	0,87	0,71
40	10	6,69	13,40	220,00	5,62	3,00	6,74	14,00	216,00	6,37	3,00	0,53	0,00
40	20	6,03	13,30	301,00	4,09	2,00	6,05	14,10	307,00	4,84	3,00	0,53	0,71
40	30	5,61	13,50	355,00	4,85	2,00	5,66	14,00	355,00	3,84	1,00	0,71	0,71
40	40	5,22	13,40	396,00	1,63	1,00	5,18	13,90	387,00	1,86	1,00	0,16	0,00

El análisis de los resultados de la tabla 11 muestra que las diferentes dosis de bentonita y *Opuntia ficus-indica* afectan de manera significativa los parámetros de calidad del agua evaluados, tales como el pH, la temperatura, la conductividad eléctrica, la turbiedad y los sólidos suspendidos totales (SST). En términos generales, se observa que el pH varía entre valores ligeramente ácidos, con una tendencia a disminuir a medida que aumentan las dosis de ambos tratamientos. En cuanto a la temperatura, se mantuvo estable entre 13 °C y 14°C en todos los tratamientos, sin una influencia notable en los resultados. La conductividad eléctrica mostró un aumento progresivo con dosis más altas de bentonita y *Opuntia*, lo que sugiere una mayor presencia de sales y iones en los tratamientos con mayores dosis.

La turbiedad fue uno de los parámetros más sensibles a los tratamientos, con valores que oscilaron entre 0,67 NTU y 8,90 NTU. Los tratamientos con dosis más bajas de bentonita y *Opuntia* presentaron turbiedad relativamente alta, mientras que aquellos con dosis mayores, como 30 mL de bentonita y 30 mL de *Opuntia*, lograron las reducciones más significativas en la turbiedad, alcanzando 0,69 NTU. Esto indica una mayor eficiencia en la clarificación del agua a medida que aumentan las dosis. Similarmente, los valores de SST mostraron una reducción considerable en los tratamientos con dosis mayores, con los menores valores alcanzados también por el tratamiento con 30 mL de bentonita y 30 mL de *Opuntia*, que presentó 1,0 mg/L de SST, reflejando una eficiente remoción de sólidos suspendidos.

La desviación estándar, que indica la variabilidad en los resultados, también mostró una menor dispersión en los tratamientos con mayores dosis de bentonita y *Opuntia*, lo que sugiere una mayor consistencia en la efectividad del tratamiento. A pesar de que el pH fue ligeramente ácido en todos los tratamientos, no se observaron efectos adversos significativos relacionados con la acidez en los resultados de turbiedad y SST.

En conclusión, el tratamiento con 30 mL de bentonita y 30 mL de *Opuntia ficus-indica* demostró ser el más eficiente en la reducción de turbiedad y sólidos suspendidos totales (SST) en el agua, alcanzando los valores más bajos para ambos parámetros. Este tratamiento no solo mostró una mayor eficiencia en la

clarificación del agua, sino también una alta consistencia en los resultados, lo que lo convierte en una opción recomendada para el tratamiento de aguas con alta turbiedad y SST, evidenciando su potencial en aplicaciones prácticas de tratamiento de aguas residuales o potables.

4.3.1. Promedio de resultados del tratamiento del agua en baja turbiedad

Se determinó el promedio entre ambas réplicas para poder obtener resultados más representativos y reducir el margen de error asociado con la variabilidad experimental, dando como resultado lo organizado en la siguiente tabla.

Tabla 12

Resultado promedio del tratamiento de agua en baja turbiedad mediante coagulación-floculación

Dosis de Bentonita (mL)	Dosis de <i>Opuntia ficus-indica</i> (Ml)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad eléctrica (µS/cm)	Turbiedad (NTU)	SST (mg/L)
10	10	6,94	13,80	134,00	4,58	3,50
10	20	6,60	13,65	255,50	1,69	1,50
10	30	5,96	13,70	323,00	4,16	2,50
10	40	5,08	13,65	342,50	1,83	2,00
20	10	6,95	13,65	177,50	6,06	3,50
20	20	6,18	13,60	274,00	3,33	1,50
20	30	5,45	13,80	327,00	2,54	1,50
20	40	5,22	13,70	363,00	1,98	1,50
30	10	6,82	13,70	197,50	8,51	3,50
30	20	6,08	13,25	304,00	7,17	2,00
30	30	5,76	13,60	347,00	0,67	1,00
30	40	5,33	13,65	388,00	2,48	1,50
40	10	6,72	13,70	218,00	6,00	3,00
40	20	6,04	13,70	304,00	4,47	2,50
40	30	5,64	13,75	355,00	4,35	1,50
40	40	5,20	13,65	391,50	1,75	1,00

Los resultados obtenidos en la tabla 12 muestran que el tratamiento de agua mediante coagulación-floculación con bentonita y *Opuntia ficus-indica* influye significativamente en la turbiedad y los sólidos suspendidos totales (SST), siendo estas variables clave para determinar la calidad del agua tratada. En términos de turbiedad, los mejores resultados se lograron con las combinaciones de 10 mL de bentonita y 20 mL de *Opuntia* (1,69 NTU), y de 30 mL de ambos coagulantes (0,67 NTU), los cuales se encuentran por debajo del valor máximo permisible establecido por el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano del Ministerio de Salud del Perú (Decreto Supremo N.º 031-2010-SA), que establece un límite de 5 NTU para turbiedad en agua tratada.

En cuanto a SST, todas las combinaciones analizadas presentaron valores entre 1,0 y 3,5 mg/L, por lo que se encuentran dentro de un rango aceptable, considerando que no existe un límite específico normado para SST en agua potable, pero se busca mantenerlo lo más bajo posible como indicador de buena clarificación.

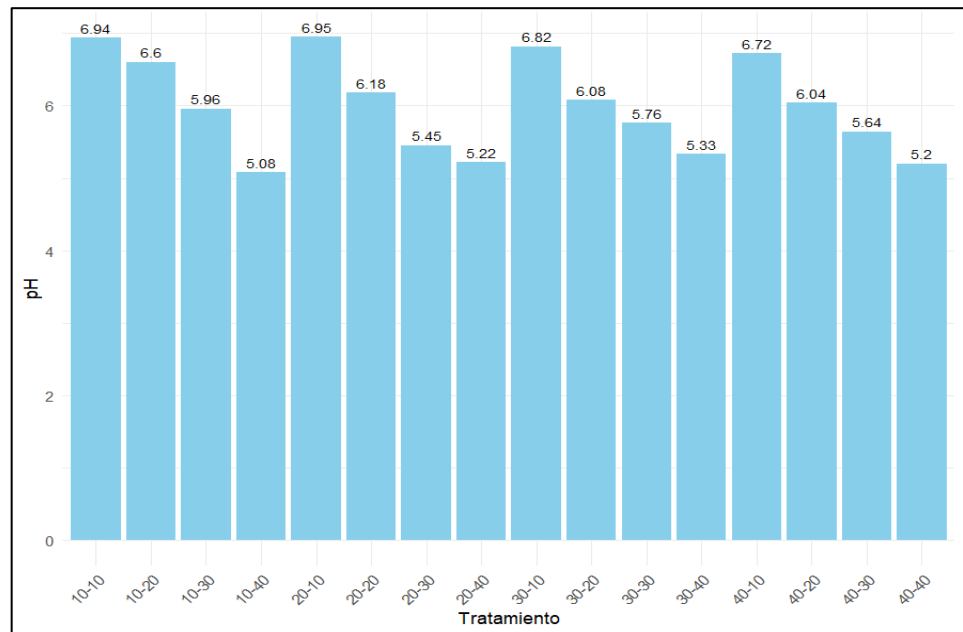
En relación con el pH, se observa una tendencia a la disminución conforme se incrementa la dosis de *Opuntia ficus-indica*, alcanzando valores mínimos de 5,08 y 5,20 con las dosis más altas (40 mL), lo cual representa un valor por debajo del rango permitido por el reglamento (6,5 a 8,5).

Esto sugiere que un exceso del coagulante natural podría acidificar el agua más allá de los límites aceptables para el consumo humano, lo que podría requerir una etapa de ajuste de pH posterior al tratamiento. La temperatura del agua se mantiene estable alrededor de los 13,6 °C, sin implicancia normativa, mientras que la conductividad eléctrica aumenta con las dosis de coagulantes, alcanzando hasta 391,5 µS/cm, sin exceder el valor máximo permitido por el reglamento (1 500 µS/cm).

En conclusión, el tratamiento con bentonita y *Opuntia* puede cumplir con los estándares de turbiedad y conductividad, pero se debe controlar la dosis para evitar que el pH del agua tratada se salga del rango normativo.

Figura 13

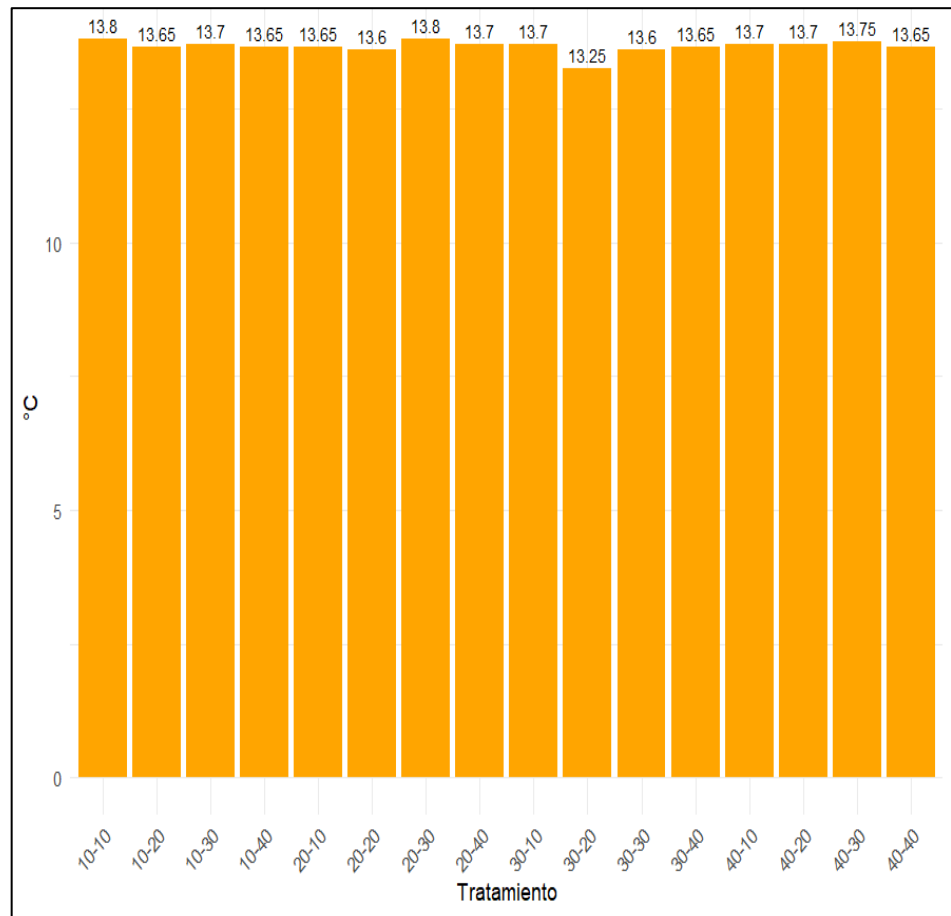
pH final después del tratamiento en baja turbiedad



La figura 13 muestra que el pH inicial del agua tratada varía según la combinación y concentración de bentonita y *Opuntia ficus-indica*. Los valores de pH más altos se observan con dosis más bajas y equilibradas de bentonita y *Opuntia ficus-indica*, concretamente a 10 mL:10 mL (pH 6,94) y 20 mL:10 mL (pH 6,95). Esto sugiere que estas concentraciones más bajas dan como resultado un pH del agua tratada casi neutro o ligeramente alcalino. A medida que aumenta la proporción de *Opuntia ficus-indica* con respecto a la bentonita, o a medida que aumenta la dosis total, existe una clara tendencia hacia valores de pH más bajos y ácidos. Las lecturas de pH más ácidas se encuentran en dosis más altas de *Opuntia ficus-indica*, particularmente a 10:40 mL (pH 5,08), 20:40 mL (pH 5,22), 30:40 mL (pH 5,33) y 40:40 mL (pH 5,2). Los tratamientos con una mayor proporción de bentonita o dosis más altas y equilibradas (p. ej., 30:10 mL con pH 6,82 o 40:10 mL con pH 6,72) tienden a tener un efecto menos pronunciado en la reducción del pH en comparación con aquellos con una mayor concentración de *Opuntia ficus-indica*. Esto indica que *Opuntia ficus-indica* contribuye de manera más significativa a la reducción del pH en el agua tratada en comparación con la bentonita dentro de los rangos de dosis probados.

Figura 14

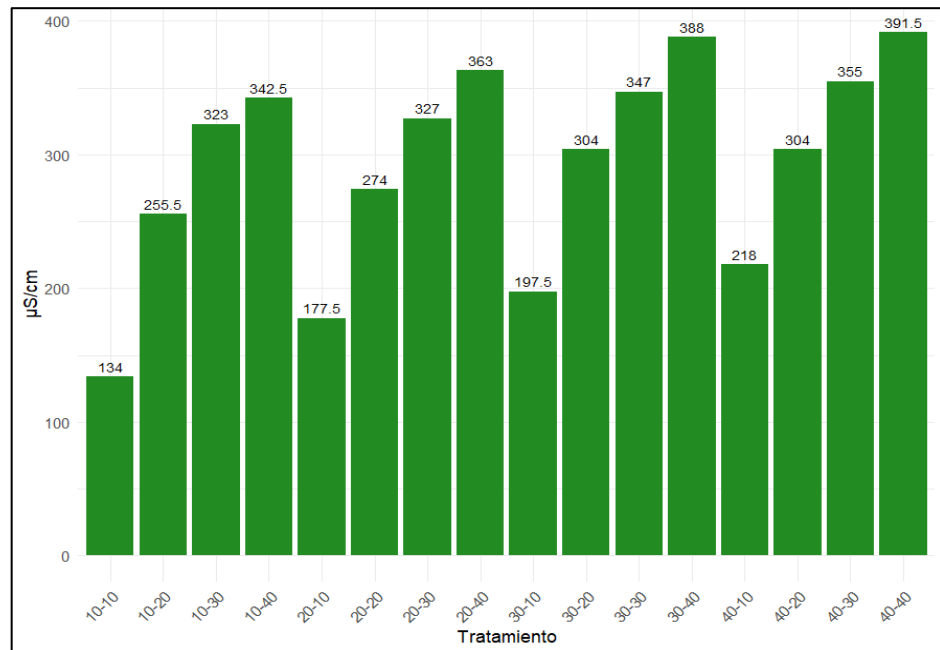
Temperatura final después del tratamiento en baja turbiedad



La figura 14 muestra que la temperatura del agua tratada se mantiene notablemente constante en todas las combinaciones y concentraciones de bentonita y *Opuntia ficus-indica* analizadas. Los valores de temperatura fluctúan dentro de un rango muy estrecho, principalmente entre 13,6 °C y 13,8 °C. Se observa una temperatura ligeramente inferior, de 13,25 °C, con la dosis de 30:20 mL. En general, las diferentes dosis de bentonita y *Opuntia ficus-indica* no parecen tener un impacto significativo ni constante en la temperatura del agua del río tratada. La temperatura se mantiene relativamente estable independientemente de la combinación o concentración específica del coagulante y floculante utilizado en el proceso de tratamiento. Esto sugiere que el tratamiento en sí no produce efectos sustanciales de calentamiento o enfriamiento en el agua.

Figura 15

Conductividad final después del tratamiento en baja turbiedad



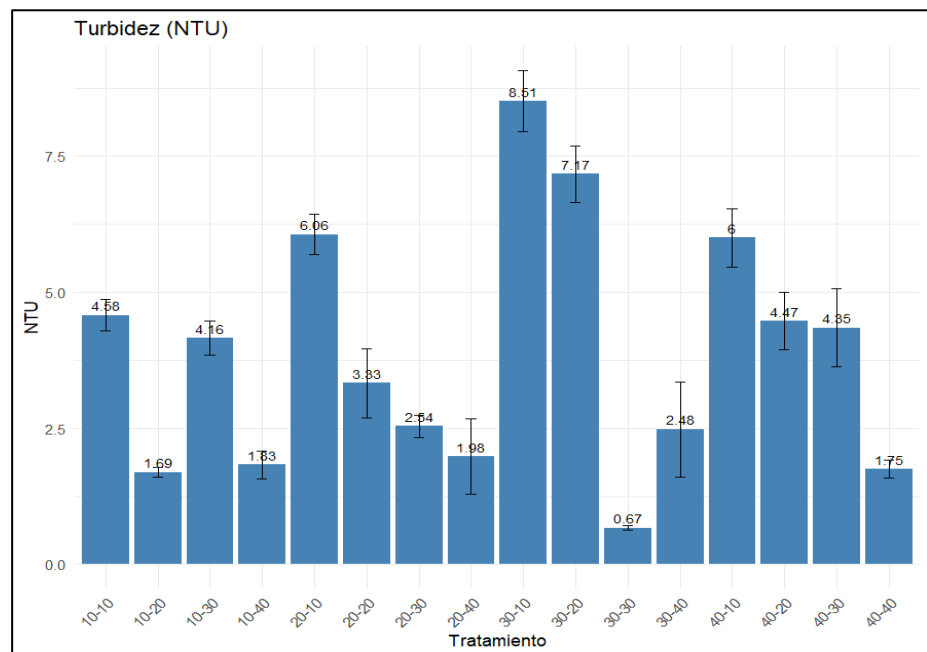
La figura 15 revela que la conductividad eléctrica del agua tratada varía considerablemente según la combinación y concentración de bentonita y *Opuntia ficus-indica* utilizadas. La conductividad más baja se observa con la dosis de 10:10 mL (134 µS/cm), lo que sugiere una menor concentración de iones disueltos en este nivel de tratamiento. A medida que aumenta la proporción de *Opuntia ficus-indica* con una dosis baja de bentonita, la conductividad eléctrica generalmente aumenta, alcanzando 342,5 µS/cm con 10:40 mL. Una tendencia similar de aumento de la conductividad con una dosis mayor de *Opuntia ficus-indica* también se observa con una dosis de bentonita de 20 mL (de 274 µS/cm con 20:10 mL a 363 µS/cm con 20:40 mL).

Sin embargo, con dosis más altas de bentonita (30 y 40 mL), la relación es menos clara. Si bien algunas dosis más altas de *Opuntia ficus-indica* aún resultan en una conductividad alta (p. ej., 30:40 mL a 388 µS/cm y 40:40 mL a 391,5 µS/cm, que son los valores más altos observados), otras combinaciones con estos niveles de bentonita muestran una conductividad menor (p. ej., 30:10 mL a 197,5 µS/cm y 40:10 mL a 218 µS/cm). En general, la conductividad eléctrica del agua tratada parece estar

influenciada tanto por la concentración de bentonita como, de forma más consistente, por la concentración de *Opuntia ficus-indica*. Dosis más altas de *Opuntia ficus-indica*, especialmente en combinación con dosis moderadas a altas de bentonita, tienden a resultar en una mayor conductividad eléctrica, lo que indica una mayor presencia de iones disueltos en el agua tratada. Las interacciones específicas entre ambos agentes de tratamiento a diferentes concentraciones dan lugar a un patrón complejo de conductividad eléctrica en el agua tratada.

Figura 16

Turbiedad final después del tratamiento en baja turbiedad



La figura 16 revela una variación significativa en los niveles de turbiedad según la combinación y concentración de bentonita y *Opuntia ficus-indica* utilizadas para el tratamiento. Valores más bajos de turbiedad indican una eliminación más eficaz de partículas en suspensión.

Entre las dosis probadas, el tratamiento con 30 mL de bentonita y 30 mL de *Opuntia ficus-indica* (30-30) presentó la turbiedad más baja (0,67 NTU), lo que sugiere que esta combinación es muy eficaz para clarificar el agua. Otros tratamientos que también lograron una turbiedad relativamente baja incluyen 10-20 (1,69 NTU), 10-40 (1,83 NTU), 20-30

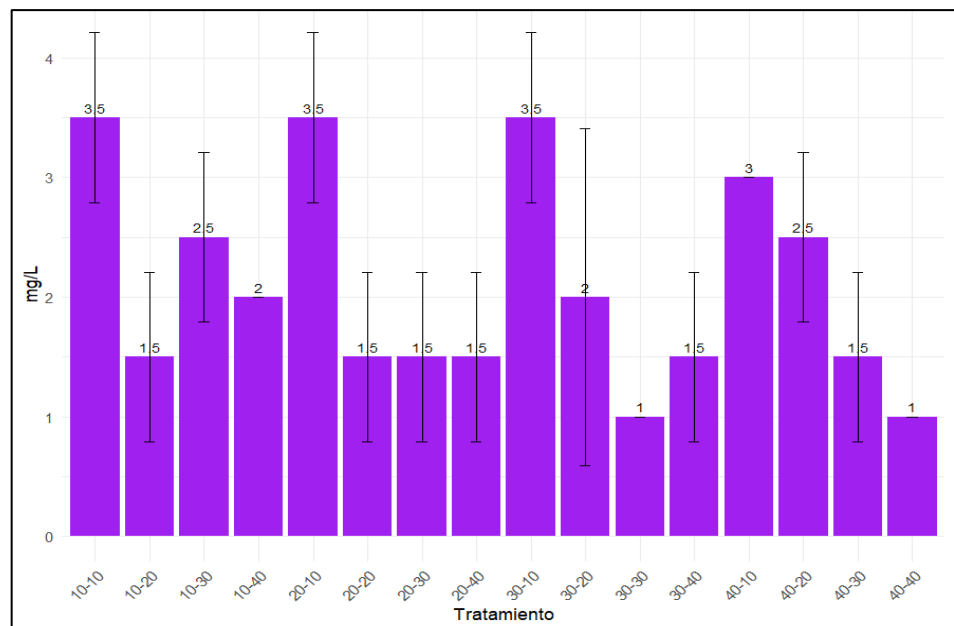
(2,74 NTU), 20-40 (1,98 NTU) y 40-40 (1,75 NTU). Estos resultados sugieren que una mayor proporción o dosis total de *Opuntia ficus-indica* tiende a contribuir a una mejor eliminación de la turbiedad en muchos casos.

Por el contrario, algunas combinaciones de tratamientos resultaron en niveles más altos de turbiedad. La turbiedad más alta se observó con la dosis de 30-10 mL (8,61 NTU), lo que indica que una alta concentración de bentonita con una baja concentración de *Opuntia ficus-indica* fue menos eficaz para eliminar la turbiedad. Otras combinaciones menos efectivas incluyen 10-10 (4,58 NTU), 20-10 (6,06 NTU), 30-20 (7,17 NTU) y 40-10 (6,0 NTU).

En general, el gráfico destaca que la eficacia de la bentonita y la *Opuntia ficus-indica* para reducir la turbiedad depende en gran medida de la proporción y concentración específicas de ambos agentes. Una proporción equilibrada o mayor de *Opuntia ficus-indica* suele resultar en una mejor clarificación del agua del río Viñas, siendo la dosis de 30:30 mL la más eficaz entre las combinaciones analizadas. Las barras de error indican la variabilidad dentro de cada grupo de tratamiento.

Figura 17

SST final después del tratamiento en baja turbiedad



La figura 17 muestra que, entre las dosis probadas, el tratamiento con 30 mL de bentonita y 30 mL de *Opuntia ficus-indica* (30-30) presentó la menor concentración de SST (1 mg/L), lo que sugiere que esta combinación es la más eficaz para la eliminación de sólidos en suspensión. Otros tratamientos que también lograron bajas concentraciones de SST incluyen 10-20 (1,5 mg/L), 20-20 (1,5 mg/L), 20-30 (1,5 mg/L), 20-40 (1,5 mg/L), 30-40 (1,5 mg/L) y 40-40 (1 mg/L). Estos resultados indican que una proporción equilibrada o mayor de *Opuntia ficus-indica* suele contribuir a una mejor eliminación de sólidos en suspensión.

Por el contrario, algunas combinaciones de tratamientos resultaron menos eficaces para eliminar los sólidos en suspensión (SST). Las concentraciones más altas de SST se observaron en 10-10 (3,5 mg/L), 20-10 (3,5 mg/L) y 30-10 (3,5 mg/L), lo que sugiere que una mayor concentración de bentonita con una menor concentración de *Opuntia ficus-indica* es menos eficaz para eliminar los sólidos en suspensión. La dosis 40-10 también resultó en una concentración relativamente alta de SST, de 3 mg/L. En general, el gráfico destaca que la eficacia de la bentonita y la *Opuntia ficus-indica* para eliminar los sólidos suspendidos totales depende en gran medida de sus proporciones y concentraciones relativas. Una dosis equilibrada o superior de *Opuntia ficus-indica* generalmente produce una reducción más significativa de la SST en el agua tratada del río Viñas, siendo las dosis de 30:30 y 40:40 mL las que presentan el mejor rendimiento entre las combinaciones probadas. Las barras de error indican la variabilidad dentro de cada grupo de tratamiento.

4.3.2. **Porcentaje de remoción de turbiedad y SST**

Para el cálculo del porcentaje de remoción, se empleó la siguiente ecuación:

$$\% \text{Remoción} = \frac{\text{Conc. inicial} - \text{Conc. final}}{\text{Conc. inicial}} \times 100$$

Tabla 13*Porcentaje de remoción de turbiedad y SST en baja turbiedad*

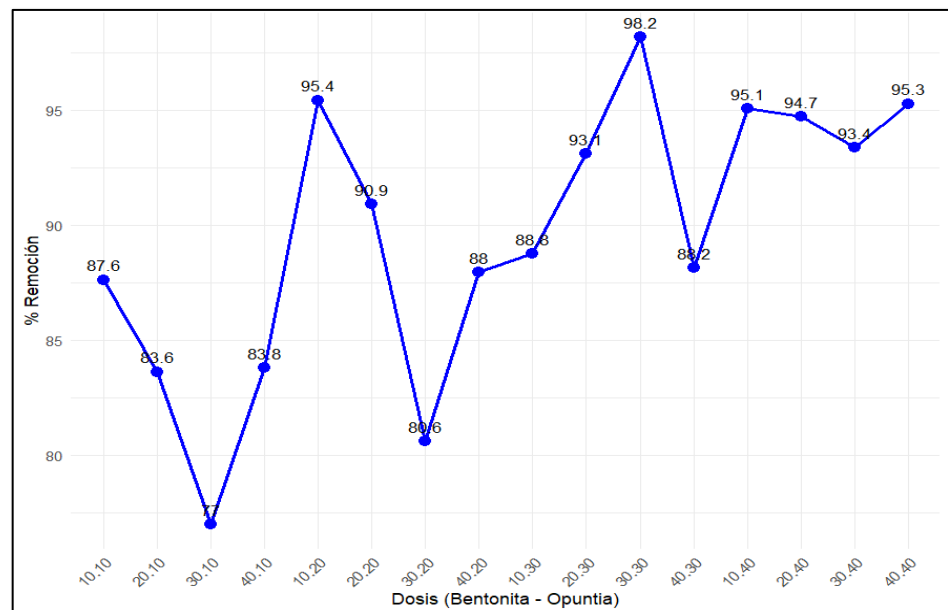
Dosis de Bentonita (mL)	Dosis de <i>Opuntia ficus-indica</i> (mL)	Réplica I		Réplica II		Promedio	
		% remoción de Turbiedad	% remoción de SST	% remoción de Turbiedad	% remoción de SST	% remoción de Turbiedad	% remoción de SST
10	10	87,51	78,57	87,74	73,33	87,63	75,95
10	20	95,37	85,71	95,51	93,33	95,44	89,52
10	30	88,74	78,57	88,77	86,67	88,76	82,62
10	40	95,31	85,71	94,85	86,67	95,08	86,19
20	10	83,46	78,57	83,79	73,33	83,63	75,95
20	20	89,23	85,71	92,62	93,33	90,92	89,52
20	30	92,34	85,71	93,87	93,33	93,11	89,52
20	40	95,74	85,71	93,69	93,33	94,72	89,52
30	10	76,83	71,43	77,18	80,00	77,00	75,71
30	20	80,57	92,86	80,67	80,00	80,62	86,43
30	30	98,03	92,86	98,36	93,33	98,19	93,10
30	40	94,69	92,86	92,08	86,67	93,38	89,76
40	10	83,94	78,57	83,67	80,00	83,80	79,29
40	20	88,31	85,71	87,59	80,00	87,95	82,86
40	30	86,14	85,71	90,15	93,33	88,15	89,52
40	40	95,34	92,86	95,23	93,33	95,29	93,10

El análisis de los porcentajes de remoción de turbiedad y sólidos suspendidos totales (SST) evidencia que tanto la bentonita como la *Opuntia ficus-indica* tienen un efecto positivo en la eficiencia del tratamiento del agua, y que su combinación puede optimizar significativamente los resultados. A medida que aumentan las dosis de ambos coagulantes, se observa una mejora general en los porcentajes de remoción. En particular, los tratamientos con 30 y 40 mL de *Opuntia*, combinados con 30 o 40 mL de bentonita, alcanzaron remociones superiores al 93 % en turbiedad y al 89 % en SST, destacándose el tratamiento con 30 mL de ambos por lograr el mayor porcentaje promedio de remoción de turbiedad (98,19 %) y SST (93,10 %). Estos resultados sugieren una sinergia entre ambos agentes que potencia la clarificación del agua.

En contraste, las dosis más bajas (10 o 20 mL) de ambos compuestos mostraron eficiencias de remoción menores, aunque aún aceptables, con promedios entre el 75 % y 89 %. Por ejemplo, el tratamiento con 10 mL de bentonita y 10 mL de *Opuntia* alcanzó un promedio de 87,63 % en remoción de turbiedad y 75,95 % en SST. Estos valores, si bien adecuados, son notablemente inferiores a los obtenidos con mayores dosis. En conjunto, los datos sugieren que existe un efecto dosis-dependiente en el rendimiento del sistema, y que las combinaciones más eficaces para la remoción simultánea de turbiedad y SST se logran con 30 mL – 30 mL de ambos agentes, lo cual podría ser una recomendación práctica para tratamientos de agua a pequeña o mediana escala.

Figura 18

Porcentaje de remoción de turbiedad - baja turbiedad

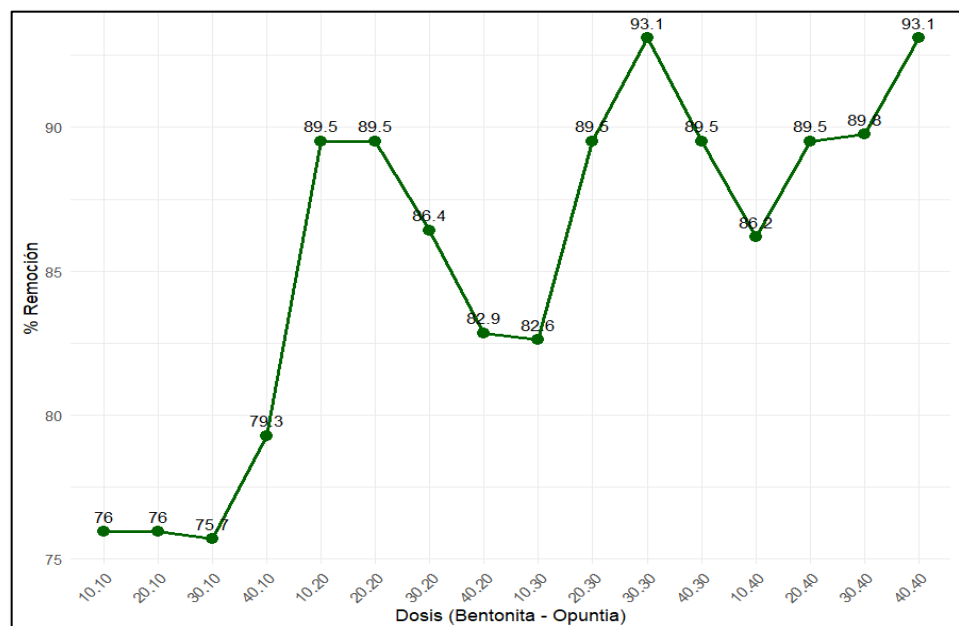


La figura 18 muestra que el porcentaje de eliminación de turbiedad varía significativamente según la combinación específica de dosis de bentonita y *Opuntia ficus-indica*. Con dosis más bajas y desequilibradas, la eficiencia de eliminación tiende a ser menor. Por ejemplo, con una proporción de 20:10 mL (20 mL de bentonita y 10 mL de *Opuntia ficus-indica*), la eliminación es de aproximadamente el 83,6 %, y disminuye aún más, hasta aproximadamente el 77 %, con una proporción de 30:10 mL. Sin embargo, a medida que aumenta la proporción o la dosis total de

Opuntia ficus-indica, la eficiencia de eliminación generalmente mejora. La mayor eliminación de turbiedad (98,2 %) se logra con la dosis de 30:30 mL (30 mL de bentonita y 30 mL de *Opuntia ficus-indica*). Otras dosis relativamente eficaces incluyen 20:20 mL (95,4 %), 40:10 mL (83,8 %), 20:30 mL (93,1 %), 40:30 mL (95,1 %) y 40:40 mL (95,3 %). La línea fluctuante indica que no existe una relación lineal simple entre la dosis total o la proporción de bentonita y *Opuntia ficus-indica* y el porcentaje de eliminación de turbiedad. Algunas combinaciones específicas, como la dosis de 30:30 mL, parecen tener un efecto sinérgico que maximiza la eliminación de turbiedad. Por el contrario, otras combinaciones, incluso con volúmenes totales mayores, podrían no ser tan efectivas. Por ejemplo, la dosis de 40:20 mL muestra una disminución en la eficiencia de eliminación en comparación con otros tratamientos con un volumen total de 40 mL. En resumen, la eliminación más eficaz de la turbiedad se logra con una dosis equilibrada de bentonita y *Opuntia ficus-indica* de 30:30 mL. La eficacia varía considerablemente según la combinación de dosis, lo que destaca la importancia de optimizar la proporción y la concentración de estos agentes coagulantes y floculantes para un tratamiento eficiente del agua.

Figura 19

Porcentaje de remoción de SST – baja turbiedad



La figura 19 indica que el porcentaje de eliminación de SST varía considerablemente según la combinación específica de dosis de bentonita y *Opuntia ficus-indica*. Con dosis totales más bajas, especialmente con una mayor proporción de bentonita (p. ej., 10:10, 20:10, 30:10 mL), la eficiencia de eliminación de SST es relativamente baja, oscilando entre aproximadamente el 75 % y el 76 %.

A medida que aumenta la dosis de *Opuntia ficus-indica* en comparación con la bentonita, se observa una mejora notable en la eliminación de SST. El aumento más significativo se produce con la dosis de 40:10 mL, alcanzando aproximadamente el 79,3 %, y aumenta aún más hasta aproximadamente el 89,5 % con las dosis de 10:20 y 20:20 mL. Esto sugiere que la incorporación de un mayor volumen de *Opuntia ficus-indica* es crucial para una eliminación eficaz de SST, especialmente con dosis totales bajas a moderadas.

La mayor eficiencia de eliminación de sólidos en suspensión (SST) (93,1 %) se alcanza con la dosis de 30:30 mL, lo que indica que un volumen total equilibrado y moderado de bentonita y *Opuntia ficus-indica* es óptimo para la eliminación de sólidos en suspensión. Si bien otras dosis totales más altas también muestran una buena eliminación (por ejemplo, a 40:30 mL y 40:40 mL, ambas alrededor del 89,6 % y 93,1 % respectivamente), el rendimiento no es consistentemente alto en todos los tratamientos de mayor volumen. Algunas combinaciones, como aquellas con una mayor proporción de bentonita en volúmenes totales más altos (por ejemplo 40:10 mL al 79,3 %), son menos efectivas.

En resumen, la eliminación más eficaz de SST se logra con una dosis equilibrada de bentonita y *Opuntia ficus-indica* de 30:30 mL. La eficacia depende de la proporción y la concentración total de ambos agentes, con una tendencia general a una mejor eliminación con una mayor proporción de *Opuntia ficus-indica*, especialmente hasta una dosis equilibrada.

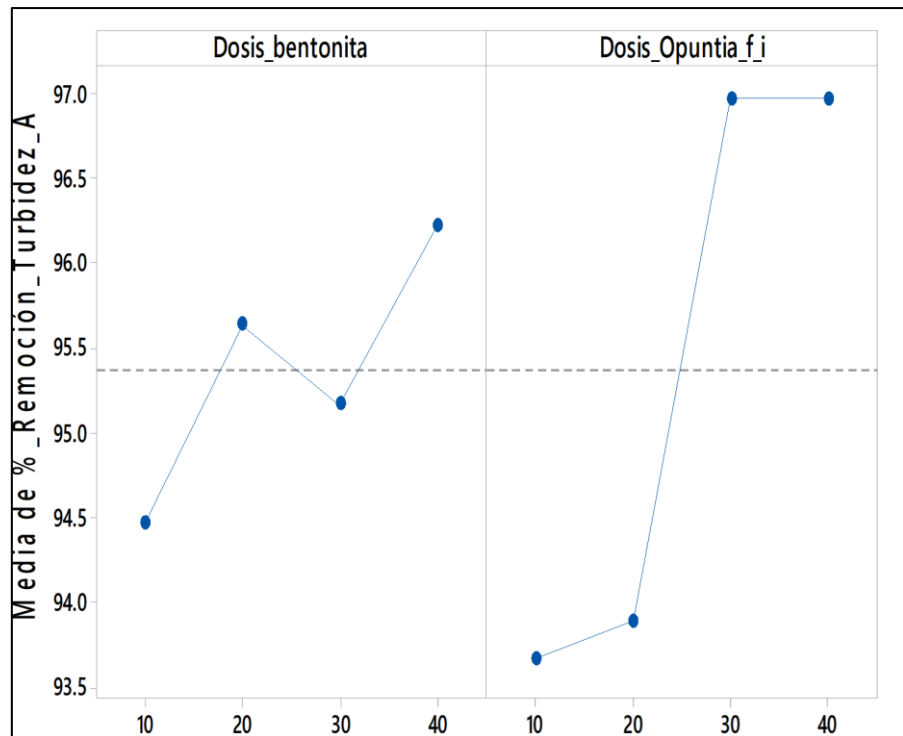
4.4. Efecto de las variables de estudio en el tratamiento de aguas mediante coagulación-floculación

4.4.1. Efecto de las variables en la remoción de turbiedad

A. Alta turbiedad

Figura 20

Efectos principales en la remoción de turbiedad (alta turbiedad)



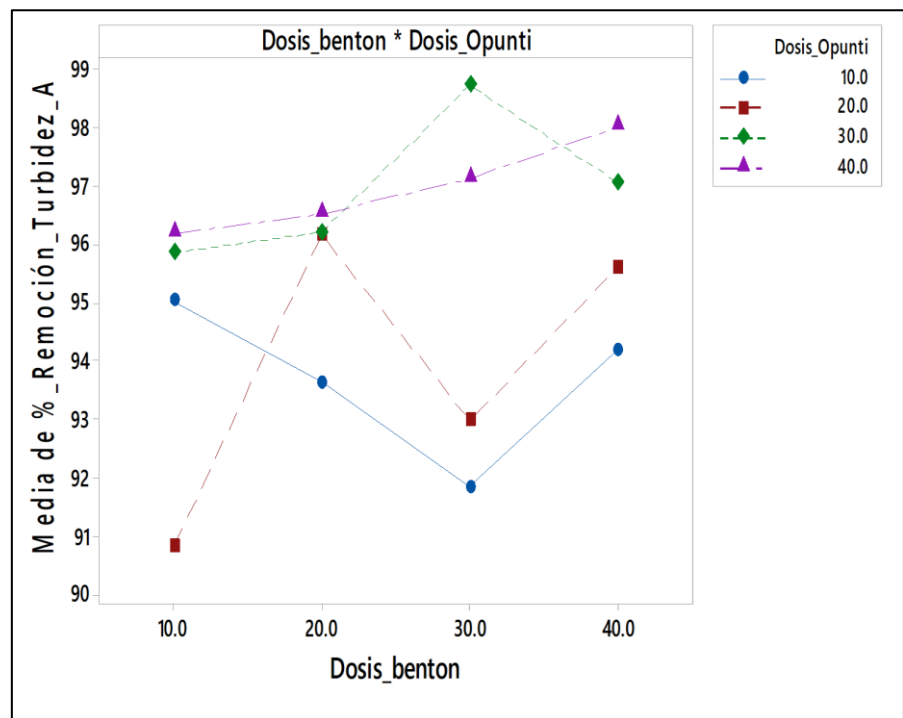
La figura 20 revela que tanto la dosis de bentonita como la de *Opuntia ficus-indica* influyen en la remoción de turbiedad del agua. En cuanto a la bentonita, se observa una mejora inicial en la remoción de turbiedad al aumentar la dosis de 10 mL a 20 mL, seguida de una ligera disminución a 30 mL, con el mejor rendimiento promedio alcanzado a 40 mL. Esto sugiere una relación no lineal donde una dosis más alta de bentonita tiende a ser más beneficiosa en promedio para la eliminación de turbiedad dentro del rango estudiado.

Por otro lado, la dosis de *Opuntia ficus-indica* muestra una clara tendencia positiva con la remoción de turbiedad. Si bien un aumento de 10 mL a 20 mL resulta en una ligera mejora, el incremento de 20

mL a 30 mL provoca un salto significativo en la eficiencia de remoción. Aumentar la dosis a 40 mL genera una mejora adicional, aunque en menor magnitud. En general, los niveles más altos de *Opuntia ficus-indica* (30 mL y 40 mL) demuestran un impacto positivo sustancial en la remoción promedio de turbiedad, indicando su importancia para optimizar el proceso de tratamiento. Para lograr la máxima eliminación de turbiedad, la aplicación de dosis elevadas de *Opuntia ficus-indica* parece ser un factor clave.

Figura 21

Interacción de variables en la remoción de turbiedad (alta turbiedad)



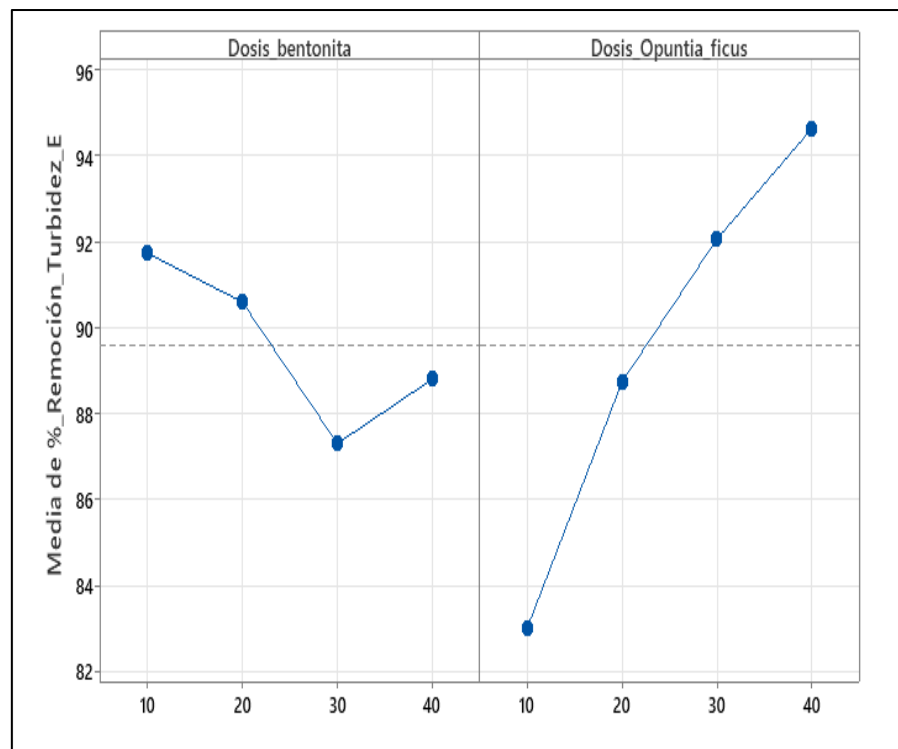
La figura 21 revela interacciones significativas entre las dosis de bentonita y *Opuntia ficus-indica*. Por ejemplo, cuando la dosis de *Opuntia ficus-indica* es baja (10 mL, línea azul), aumentar la dosis de bentonita inicialmente mejora la eliminación de turbiedad de 10 mL a 20 mL, pero aumentos posteriores a 30 mL y 40 mL conducen a una disminución. Sin embargo, a una dosis más alta de *Opuntia ficus-indica* de 30 mL (línea discontinua verde), aumentar la dosis de bentonita generalmente conduce a una mejor eliminación de turbiedad en todo el rango probado. En particular, la eliminación de turbiedad

más alta (que se acerca al 99%) se logra cuando tanto la bentonita como *Opuntia ficus-indica* están en una dosis de 30 mL. Las líneas no son paralelas, lo que indica que el efecto de cambiar la dosis de bentonita en la eliminación de turbiedad depende del nivel de dosis específico de *Opuntia ficus-indica* que se utiliza, y viceversa. Esta falta de paralelismo subraya la importancia de considerar el efecto combinado de estos dos agentes de tratamiento en lugar de sus efectos individuales por separado para optimizar la eliminación de la turbiedad.

B. Baja turbiedad

Figura 22

Efectos principales en la remoción de turbiedad (baja turbiedad)

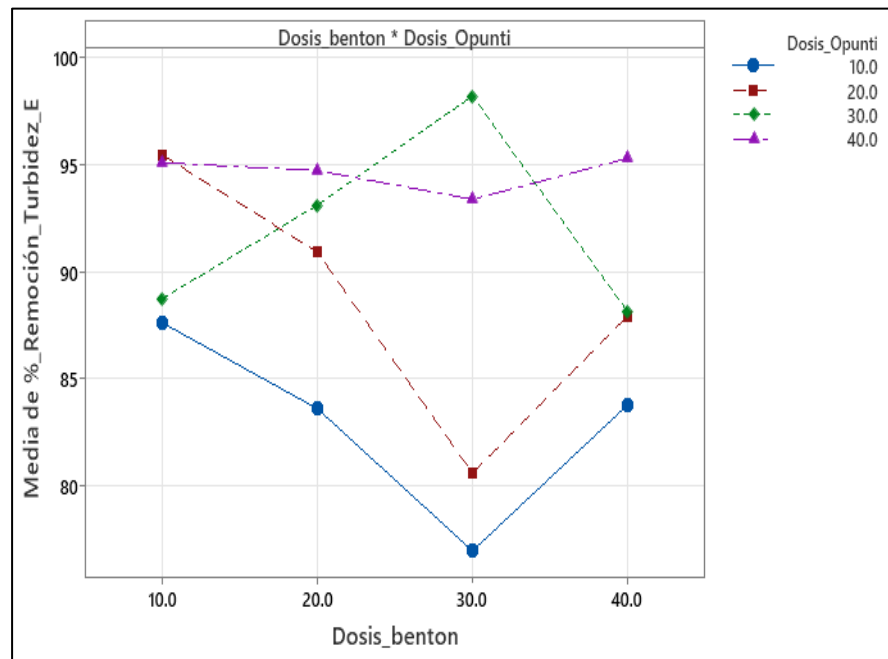


La figura 22 muestra el efecto individual de las dosis de bentonita y *Opuntia ficus-indica* sobre la eficiencia de remoción de turbiedad. En el caso de la bentonita, se observa una ligera disminución en la eficiencia a medida que la dosis aumenta de 10 mL a 30 mL, con una leve recuperación en 40 mL. Esto sugiere que, en condiciones de estiaje, dosis intermedias de bentonita podrían no ser las más eficaces.

Por otro lado, la *Opuntia ficus-indica* muestra un efecto positivo claro: a mayor dosis, mayor eficiencia de remoción, alcanzando su punto más alto con 40 mL. Este comportamiento indica que el floculante natural tiene un impacto creciente y constante sobre la mejora de la calidad del agua.

Figura 23

Interacción de variables en la remoción de turbiedad (baja turbiedad)



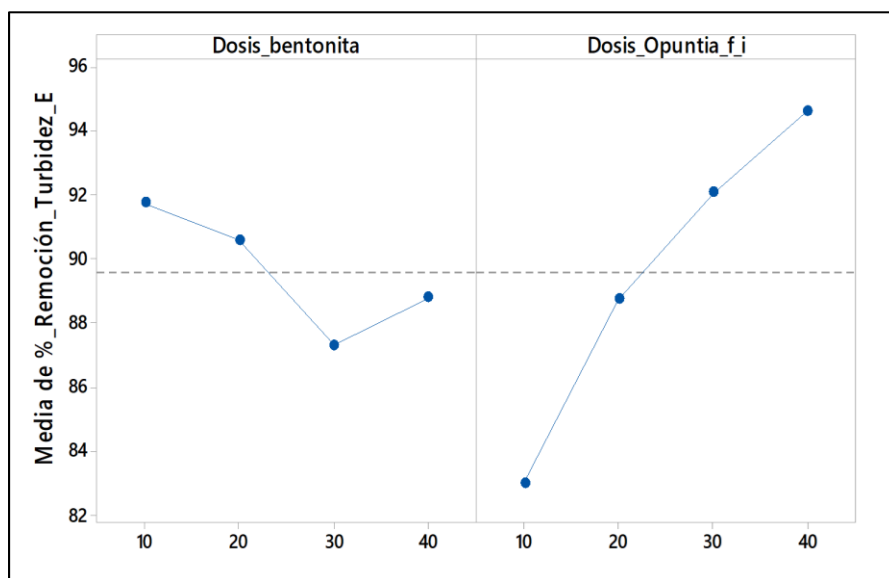
La figura 23 analiza la interacción entre las dosis de bentonita y *Opuntia ficus-indica* en la remoción de turbiedad. Se evidencia que no todas las combinaciones generan el mismo efecto. La combinación 30 mL de cada insumo presenta la mayor eficiencia, con valores cercanos al 99 %, mientras que algunas combinaciones desbalanceadas, como 30 mL de bentonita con 10 mL de *Opuntia*, presentan las menores eficiencias (alrededor del 80 %). También se observa que para ciertas dosis de *Opuntia* (especialmente 30 mL), la eficiencia depende notablemente de la dosis de bentonita utilizada, indicando una interacción sinérgica entre ambos insumos. Esta gráfica permite concluir que el efecto combinado no es simplemente aditivo, sino que ciertas proporciones específicas maximizan la remoción de turbiedad.

4.4.2. Efecto de las variables en la remoción de SST

A. Alta turbiedad

Figura 24

Efectos principales en la remoción de SST



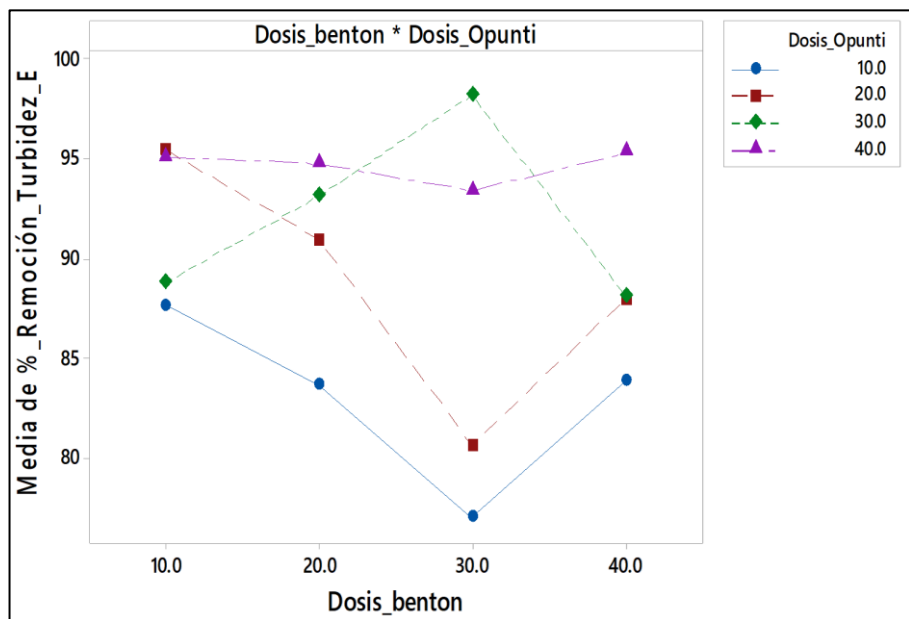
La figura 24 muestra el panel izquierdo muestra el porcentaje promedio de remoción de turbiedad en función de diferentes dosis de bentonita (10 mL, 20 mL, 30 mL y 40 mL), promediando los resultados obtenidos con todas las dosis de *Opuntia ficus-indica*. La tendencia general revela una disminución inicial en la eficiencia de remoción al incrementar la dosis de bentonita de 10 mL a 30 mL, registrándose el valor más bajo con 30 mL. Al aumentar la dosis a 40 mL se observa una leve recuperación, aunque sin superar el rendimiento obtenido con la dosis inicial de 10 mL. Estos resultados sugieren que, en promedio, dosis elevadas de bentonita no mejoran la remoción de turbiedad y podrían incluso reducir su eficacia, posiblemente por efectos de sobresaturación o interferencia en el proceso de coagulación-floculación.

Por otro lado, el panel derecho representa el promedio de remoción de turbiedad según diferentes dosis de *Opuntia ficus-indica* (10 mL, 20 mL, 30 mL y 40 mL), considerando el promedio de todas las dosis de

bentonita. En este caso, se evidencia una tendencia positiva clara: a mayor dosis de *Opuntia ficus-indica*, mayor eficiencia de remoción. El incremento más notable ocurre entre 20 mL y 40 mL, lo que sugiere que esta biocoagulante vegetal tiene un efecto significativo y directamente proporcional sobre la mejora de la calidad del agua. La línea discontinua representa el valor promedio general de remoción para todas las condiciones evaluadas. Las combinaciones que superan esta línea indican un desempeño superior al promedio, mientras que aquellas por debajo reflejan un rendimiento menos eficiente. En conjunto, los resultados evidencian que, mientras la bentonita presenta una relación no lineal con la remoción de turbiedad, la *Opuntia ficus-indica* muestra una correlación positiva directa, destacándose como un agente coagulante más efectivo en dosis elevadas.

Figura 25

Interacción de variables en la remoción de SST



La figura 25 evidencia interacciones significativas entre las dosis de bentonita y *Opuntia ficus-indica* en la remoción de turbiedad. Por ejemplo, cuando la dosis de *Opuntia ficus-indica* es baja (10 mL, línea azul), el incremento de la dosis de bentonita produce inicialmente una disminución en la eficiencia de remoción, alcanzando su punto mínimo

con 30 mL de bentonita, antes de mostrar una leve recuperación con 40 mL. En contraste, con una dosis más alta de *Opuntia ficus-indica* (30 mL, línea discontinua verde), el aumento progresivo de la dosis de bentonita tiende a mejorar la remoción de turbiedad, observándose el mayor porcentaje de eliminación con 30 mL de ambos agentes. Este comportamiento sugiere que la dosis óptima de bentonita está condicionada por la cantidad de *Opuntia ficus-indica* utilizada, y viceversa.

Además, el hecho de que las líneas no sean paralelas y se crucen entre sí resalta que los efectos de ambos coagulantes no son aditivos ni independientes, sino que existe una interacción significativa entre ellos. Esto implica que la eficacia del tratamiento no depende únicamente de las dosis individuales, sino de su combinación específica. Por tanto, para optimizar la remoción de turbiedad, es fundamental considerar cuidadosamente las interacciones entre las dosis de bentonita y *Opuntia ficus-indica*, seleccionando combinaciones que actúen de forma sinérgica y no contraproducente.

4.5. Comparación de resultados en alta turbiedad y baja turbiedad

Los resultados obtenidos muestran diferencias claras en la eficiencia del tratamiento entre la alta turbiedad y la de baja turbiedad. Durante la alta turbiedad, caracterizada por un mayor caudal y mayor carga de sólidos en suspensión, las eficiencias de remoción de turbiedad y SST fueron en general más variables y, en algunos casos, ligeramente inferiores, lo cual puede atribuirse a la mayor carga contaminante y dilución de los coagulantes naturales. En contraste, en baja turbiedad, cuando el caudal y la carga contaminante son menores, se observó una mayor estabilidad en los porcentajes de remoción y una tendencia a mejores resultados con ciertas combinaciones de dosis, especialmente aquellas con mayores concentraciones de *Opuntia ficus-indica*. Estos hallazgos sugieren que la efectividad del tratamiento depende en gran medida de las condiciones hidrológicas, siendo necesario ajustar las dosis de los agentes coagulantes de acuerdo con la época del año para maximizar su rendimiento.

Tabla 14*Mejores resultados en alta turbiedad y baja turbiedad*

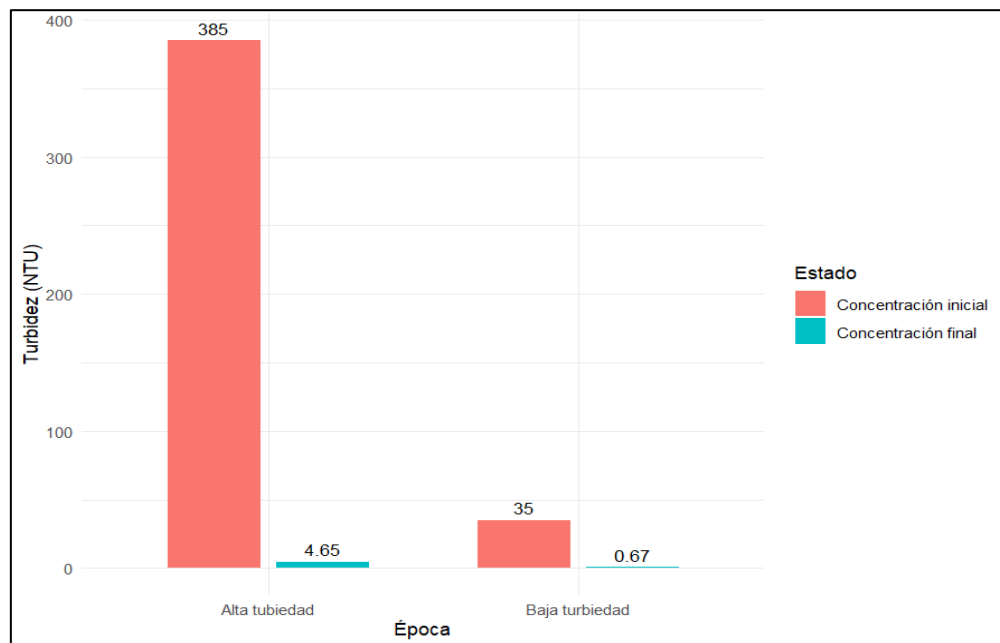
Época	Dosis de Bentonita (mL)	Dosis de <i>Opuntia ficus-indica</i> (mL)	% Remoción de Turbiedad	% Remoción de SST	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (μS/cm)
Alta turbiedad	30	30	98,74	99,33	5,52	13,60	360
Baja turbiedad	30	30	98,19	93,10	5,76	13,60	347

La Tabla 13 presenta los mejores resultados obtenidos durante las épocas 0 de alta turbiedad y baja turbiedad utilizando una misma combinación de dosis: 30 mL de bentonita y 30 mL de *Opuntia ficus-indica*. En ambos periodos, esta combinación demostró una alta eficiencia en la remoción de turbiedad y sólidos suspendidos totales (SST), aunque con ligeras diferencias entre las condiciones ambientales. Durante la alta turbiedad, se alcanzó la mayor eficiencia de remoción, con un 98,74 % en turbiedad y un 99,33 % en SST, lo que puede atribuirse al pH más ácido (5,52), mayor temperatura (13,60 °C) y menor conductividad (360 μS/cm), condiciones que parecen favorecer la coagulación y floculación.

En la baja turbiedad, aunque se mantuvieron las mismas dosis, la eficiencia en la remoción de turbiedad fue ligeramente inferior (98,19 %) y la remoción de SST se redujo a 93,10 %. Esta disminución puede estar relacionada con el pH ligeramente más alto (5,76), una temperatura mayor (13,60 °C) y una conductividad un poco menor (347 μS/cm). Estos resultados indican que, si bien la combinación de 30 mL de bentonita y 30 mL de *Opuntia ficus-indica* es altamente efectiva en ambas épocas, las condiciones fisico-químicas del agua influyen en el rendimiento del tratamiento, siendo más favorable en alta turbiedad.

Figura 26

Remoción de turbiedad en baja turbiedad y alta turbiedad



La figura 26 evidencia una notable reducción de la turbiedad en ambas épocas tras el tratamiento con 30 mL de bentonita y 30 mL de *Opuntia ficus-indica*, aunque con diferencias marcadas entre ellas. En la alta turbiedad, la turbiedad inicial fue de 385 NTU, reduciéndose a 4,65 NTU, mientras que en la baja turbiedad disminuyó de 35 NTU a 0,67 NTU. Esta diferencia se explica por el arrastre de una mayor cantidad de sedimentos, materia orgánica y sólidos suspendidos durante las lluvias, lo que incrementa significativamente la turbiedad del agua. A pesar de estas condiciones más severas, el tratamiento demostró ser altamente eficiente en ambas épocas, logrando remover más del 98 % de la turbiedad inicial, lo que resalta su eficacia frente a distintas cargas contaminantes.

4.6. Contrastación de hipótesis de la investigación

Para la contrastación de hipótesis se realizó una prueba de normalidad seguido de un análisis estadístico como se muestra continuación.

Hipótesis general

H₀: El uso combinado de bentonita y *Opuntia ficus-indica* como coagulante-floculante no influye en los parámetros fisicoquímicos del tratamiento de aguas crudas en Pampas.

H₁: El uso combinado de bentonita y *Opuntia ficus-indica* como coagulante-floculante sí influye en los parámetros fisicoquímicos del tratamiento de aguas crudas en Pampas.

Hipótesis específica 1

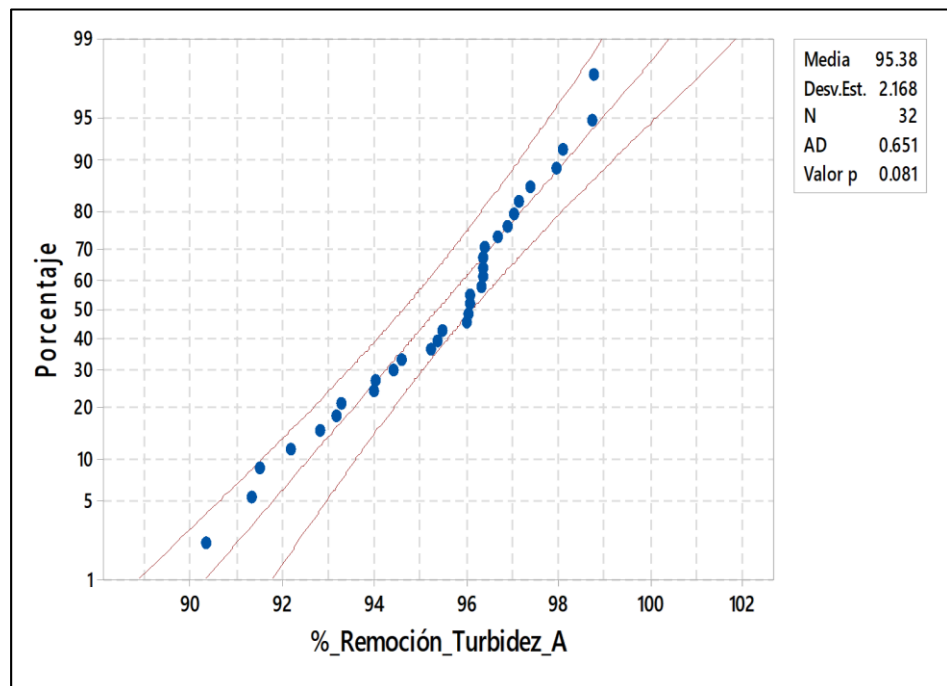
H₀: La variación de dosis de la bentonita y *Opuntia ficus-indica* no tiene un efecto significativo sobre la remoción de la turbiedad de aguas crudas en condiciones de alta y baja turbiedad.

H₁: La variación de dosis de la bentonita y *Opuntia ficus-indica* tiene un efecto significativo sobre la remoción de la turbiedad de aguas crudas en condiciones de alta y baja turbiedad.

4.6.1. Remoción de turbiedad y SST a alta turbiedad

Figura 27

Gráfica de probabilidad normal para la remoción de turbiedad (alta turbiedad)



La Figura 27 muestra la prueba de normalidad para la remoción de turbiedad, y el valor obtenido de " $p > 0,05$ " indica que se acepta la hipótesis nula. Esto significa que, estadísticamente, los datos proceden de una

población normal. Por lo tanto, se puede utilizar la prueba paramétrica de análisis de varianza (ANOVA) para la contratación de hipótesis.

Tabla 15

Resumen del modelo de turbiedad (alta turbiedad)

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
1,54457	52,51%	49,23%	43,25%

El resumen del modelo para la remoción de turbiedad en condiciones de alta turbiedad indica que el modelo de regresión explica el 52,51% de la variabilidad total observada en los datos (%R²), lo cual representa una capacidad moderada de explicación. El R² ajustado (49,23%) corrige por el número de predictores usados, confirmando que el modelo sigue siendo válido al considerar su complejidad. Por su parte, el R² predictivo (43,25%) refleja la capacidad del modelo para predecir nuevos datos con cierto nivel de confianza. El valor de S (1,54457) indica el error estándar de la estimación, es decir, cuánto se desvían en promedio los valores observados de los valores estimados por el modelo. En conjunto, este modelo tiene un desempeño aceptable, aunque deja espacio para mejorar su precisión explicativa y predictiva.

Ecuación de regresión

$$\%_{\text{Remoción Turbiedad}_E} = 90,939 + 0,0478 \text{ Dosis}_{\text{bentonita}} + 0,1298 \text{ Dosis}_{\text{Opuntia ficus}}$$

Esta fórmula indica que, en promedio, por cada mililitro adicional de bentonita, la eficiencia de remoción de turbiedad aumenta en 0,0478%, mientras que por cada mililitro adicional de *Opuntia ficus-indica*, el aumento es de 0,1298%. Esto sugiere que ambos coagulantes contribuyen positivamente al proceso, aunque el efecto de *Opuntia ficus-indica* es más pronunciado. En conjunto, el modelo permite estimar la remoción de turbiedad en función de las dosis utilizadas, proporcionando una herramienta útil para optimizar el tratamiento del agua.

Tabla 16*Análisis de varianza de la turbiedad (alta turbiedad)*

Fuente	G L	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	16	144,672	9,0420	134,45	0,000
Bloques	1	1,664	1,6643	24,75	0,000
Lineal	6	94,663	15,7771	234,60	0,000
Dosis_bentonita	3	13,125	4,3751	65,06	0,000
Dosis_ <i>Opuntia_f_i</i>	3	81,537	27,1791	404,15	0,000
Interacciones de 2 términos	9	48,346	5,3717	79,88	0,000
Dosis_bentonita*Dosis_ <i>Opuntia_f_i</i>	9	48,346	5,3717	79,88	0,000
Error	15	1,009	0,0673		
Total	31	145,681			

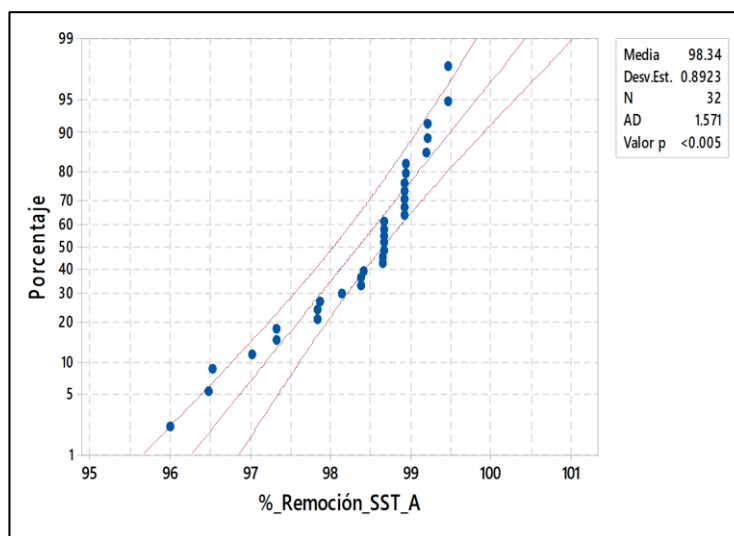
De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis de varianza (ANOVA) para la remoción de turbiedad en condiciones de alta turbiedad, se observa que la variación en las dosis de bentonita y *Opuntia ficus-indica* tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la eficiencia del tratamiento de agua cruda (Valor F = 134,45; p = 0,000).

Tanto la dosis de bentonita (p = 0,000) como la dosis de *Opuntia ficus-indica* (p = 0,000) presentan efectos significativos de manera individual, siendo esta última la que explica en mayor proporción la variabilidad del modelo (SC ajustada = 81,537). Además, la interacción entre ambas variables también resulta significativa (p = 0,000), lo que indica que el efecto de un componente depende del nivel del otro, reforzando la existencia de una acción combinada entre coagulante y floculante.

Dado que el valor p de todos los efectos evaluados es menor al nivel de significancia habitual ($\alpha = 0,05$), se rechaza la hipótesis nula (H_0) de la hipótesis específica 1, y se acepta la hipótesis alternativa (H_1). Por tanto, se concluye que la variación de dosis de bentonita y *Opuntia ficus-indica* afecta de manera significativa en la remoción de turbiedad en aguas crudas, confirmando la efectividad del uso combinado de estos coagulantes naturales bajo condiciones de alta turbiedad.

Figura 28

Gráfica de probabilidad normal para la remoción de SST



La Figura 28 indica que, al realizar la prueba de normalidad para la remoción de SST, el valor obtenido de " $p < 0,05$ " sugiere que se acepta la hipótesis alterna. En términos estadísticos, esto implica que los datos proceden de una distribución no normal. Por lo tanto, podemos utilizar la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para contrastar hipótesis.

Tabla 17

Resumen del modelo de SST (alta turbiedad)

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
0,658434	49,06%	45,55%	38,04%

La Tabla 17, que resume el modelo de regresión para la remoción de sólidos suspendidos totales (SST) en condiciones de alta turbiedad, muestra un error estándar de estimación (S) de 0,6584, lo que indica que, en promedio, los valores predichos difieren del valor real en aproximadamente 0,66 unidades. El coeficiente de determinación (R-cuadrado) es de 49,06%, lo que significa que casi la mitad de la variabilidad en la remoción de SST puede explicarse por las dosis de bentonita y *Opuntia ficus-indica*. El R-cuadrado ajustado (45,55%) y el R-cuadrado predictivo (38,04%) sugieren que el modelo tiene una capacidad

moderada para explicar y predecir los resultados, aunque hay otros factores no considerados que también influyen en la remoción de SST.

Ecuación de regresión

$$\% \text{ Remoción SST}_E = 96,523 + 0,0226 \text{ Dosis bentonita} + 0,0502 \text{ Dosis Opuntia ficus}$$

La ecuación de regresión indica que, en condiciones de alta turbiedad, la remoción estimada de sólidos suspendidos totales (SST) aumenta ligeramente con el incremento de las dosis tanto de bentonita como de *Opuntia ficus-indica*. En concreto, por cada mililitro adicional de bentonita, la remoción de SST se incrementa en aproximadamente 0,0226%, mientras que por cada mililitro extra de *Opuntia ficus-indica*, se incrementa en 0,0502%. El valor constante de 96,523 representa la eficiencia estimada de remoción cuando ambas dosis son cero, lo cual no es realista físicamente, pero sirve como punto de partida del modelo. Esta relación sugiere que *Opuntia ficus-indica* tiene un mayor impacto en la remoción de SST que la bentonita en este contexto experimental.

A. Prueba de Kruskal-Wallis: Dosis de *Opuntia ficus-indica* – alta turbiedad

Tabla 18

Estadística descriptiva de la dosis de Opuntia ficus-indica (alta turbiedad)

Dosis de <i>Opuntia ficus-indica</i>	N	Mediana	Clasificación de medias	Valor Z
10	8	97,8435	7,8	-3,05
20	8	98,2337	11,2	-1,85
30	8	98,9130	22,4	2,05
40	8	98,9218	24,7	2,85
General	32		16,5	

Tabla 19

Kruskal-Wallis de dosis de la dosis de Opuntia ficus-indica (alta turbiedad)

Método	GL	Valor H	Valor p
No ajustado para empates	3	18,76	0,000
Ajustado para empates	3	18,92	0,000

La prueba de Kruskal-Wallis muestra diferencias significativas en las medianas de remoción de SST entre las distintas dosis de *Opuntia ficus-indica*.

Las dosis más bajas (10 mL y 20 mL) presentan medianas de remoción menores (97,84% y 98,23%), mientras que las dosis más altas (30 mL y 40 mL) alcanzan las mayores medianas (98,91% y 98,92%). Los valores Z indican que las dosis de 30 mL y 40 mL están asociadas a una mayor eficiencia en la remoción de SST, mientras que las dosis más bajas están por debajo de la mediana general.

Asimismo, se arrojó un valor $H = 18,76$ y un $p\text{-valor} = 0,000$, indicando diferencias estadísticamente significativas entre los distintos niveles de dosis de *Opuntia ficus-indica*. Este resultado permite rechazar la hipótesis nula (H_0) general, ya que existe evidencia suficiente para afirmar que la variación en las dosis de *Opuntia ficus-indica* sí tiene un efecto real sobre el parámetro fisicoquímico evaluado.

B. Prueba de Kruskal-Wallis: Dosis de bentonita - alta turbiedad

Tabla 20

Estadística descriptiva dosis de bentonita (alta turbiedad)

Dosis_bentonita	N	Mediana	Clasificación de medias	Valor Z
10	8	98,3826	11,6	-1,70
20	8	98,6631	15,9	-0,20
30	8	98,3783	16,9	0,15
40	8	98,9130	21,5	1,74
General	32		16,5	

Tabla 21

Kruskal-Wallis de dosis de la dosis de bentonita (alta turbiedad)

Método	GL	Valor H	Valor p
No ajustado para empates	3	4.48	0,214
Ajustado para empates	3	4.52	0,211

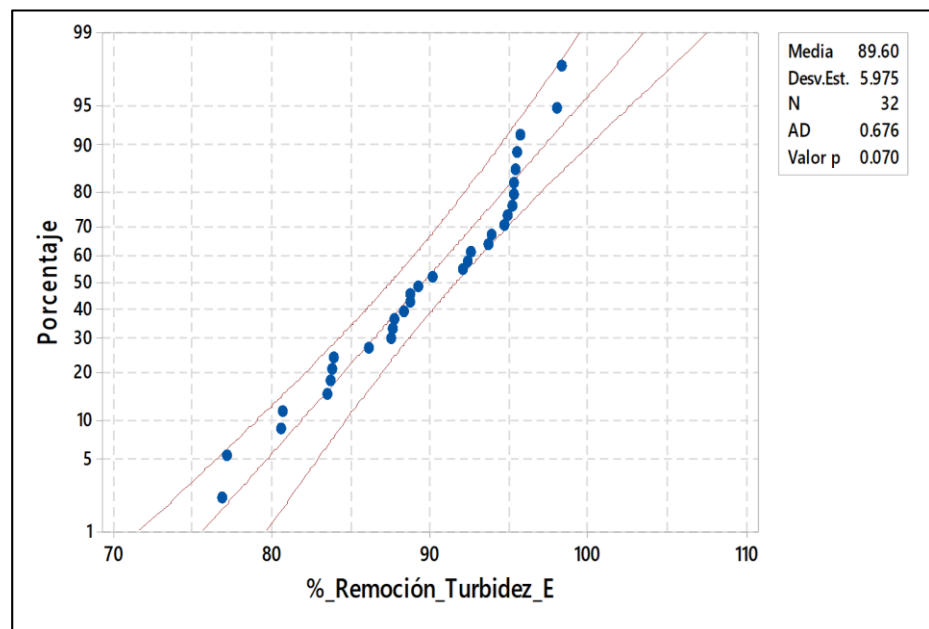
La prueba de Kruskal-Wallis aplicada a los datos de remoción de SST no mostró diferencias estadísticamente significativas entre las distintas dosis de bentonita (10, 20, 30 y 40 mL), como lo indica el valor $H = 4,52$ y el valor $p = 0,211$. Esto significa que no se puede rechazar la hipótesis nula, por lo tanto, no hay evidencia suficiente para afirmar que la dosis de bentonita afecte significativamente en la eficiencia de remoción de SST.

Este resultado es consistente con la hipótesis nula general, según la cual la dosis de bentonita como coagulante podría no afectar significativamente en los parámetros fisicoquímicos del agua tratada. Aunque de forma descriptiva se observa una ligera mejora en la remoción de SST con dosis más altas, estas diferencias no son estadísticamente relevantes según la prueba no paramétrica aplicada.

4.6.2. Remoción de turbiedad y SST a baja turbiedad

Figura 29

Gráfica de probabilidad normal para la remoción de turbiedad (baja turbiedad)



La Figura 29 muestra la prueba de normalidad para la remoción de turbiedad, y el valor obtenido de " $p > 0,05$ " indica que se acepta la

hipótesis nula. Esto significa que, estadísticamente, los datos proceden de una población normal. Por lo tanto, se puede utilizar la prueba paramétrica de análisis de varianza (ANOVA) para la contratación de hipótesis.

Tabla 22

Resumen del modelo de turbiedad (baja turbiedad)

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
4,01414	57,78%	54,87%	50,61%

El resumen del modelo para el análisis de normalidad en la remoción de turbiedad a baja turbiedad inicial indica que el modelo explica moderadamente bien la variabilidad de los datos, con un R² ajustado de 54,87% y un R² predicho de 50,61%, lo que sugiere que más de la mitad de la variación en los datos puede atribuirse a los factores evaluados.

El error estándar (S = 4,01) muestra una dispersión aceptable, y en conjunto, estos resultados respaldan que el modelo es adecuado para describir y predecir la remoción de turbiedad bajo condiciones de alta turbiedad inicial, aunque existe margen de mejora.

Ecuación de regresión

$$\%_Remoción_Turbiedad_E = 83,09 - 0,1208 \text{ Dosis_bentonita} + 0,3812 \text{ Dosis_Opuntia_ficus}$$

La ecuación de regresión obtenida indica que el porcentaje de remoción de turbiedad esperada (%_Remoción_Turbiedad_E) se ve influido negativamente por la dosis de bentonita y positivamente por la dosis de *Opuntia ficus-indica*. Específicamente, por cada mL adicional de bentonita, la remoción disminuye en 0.1208 unidades, mientras que por cada mL adicional de *Opuntia ficus-indica*, la remoción aumenta en 0.3812 unidades. Esto sugiere que, dentro del modelo evaluado, *Opuntia ficus-indica* tiene un mayor impacto positivo en la eficiencia del tratamiento que la bentonita.

Tabla 23*Análisis de varianza de la turbiedad (baja turbiedad)*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	16	1086,36	67,897	49,60	0,000
Bloques	1	0,55	0,551	0,40	0,535
Lineal	6	693,76	115,626	84,47	0,000
Dosis_bentonita	3	91,56	30,520	22,30	0,000
Dosis_Opuntia_f_i	3	602,20	200,732	146,64	0,000
Interacciones de 2 términos	9	392,05	43,561	31,82	0,000
Dosis_bentonita*Dosis_Opuntia_f_i	9	392,05	43,561	31,82	0,000
Error	15	20,53	1,369		
Total	31	1106,89			

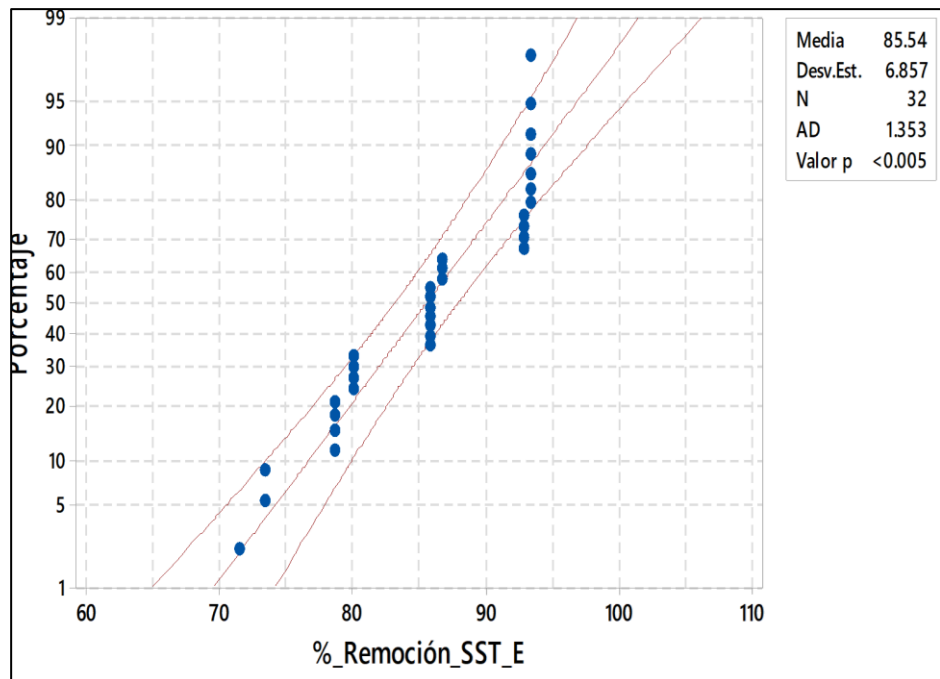
La Tabla 23 muestra los resultados del análisis de varianza (ANOVA) aplicado al porcentaje de remoción de turbiedad en condiciones de baja turbiedad inicial. El modelo general resultó estadísticamente significativo (Valor F = 49,60; p = 0,000), lo que indica que las variables evaluadas — dosis de bentonita, dosis de *Opuntia ficus-indica* y su interacción— explican de manera importante la variabilidad observada en la eficiencia del tratamiento. Estos resultados permiten rechazar la hipótesis nula general (H_0), que sostenía que el uso combinado de bentonita y *Opuntia ficus-indica* no influye en los parámetros fisicoquímicos del tratamiento de aguas crudas. En consecuencia, se acepta la hipótesis alternativa (H_1), confirmando que el uso conjunto de ambos agentes coagulantes-floculantes sí tiene un efecto significativo sobre la calidad del agua tratada, incluso bajo condiciones de baja carga inicial, como las registradas en Pampas.

En relación con la hipótesis específica 1, se evidencia que la variación de dosis de bentonita tiene un efecto estadísticamente significativo en la remoción de turbiedad (Valor F = 22,30; p = 0,000), lo cual permite rechazar la hipótesis nula que indicaba que dicha variable no influye en el proceso. De igual manera, la dosis de *Opuntia ficus-indica* muestra un efecto altamente significativo (Valor F = 146,64; p = 0,000), siendo el factor con mayor capacidad explicativa dentro del modelo (SC ajustada =

602,20), lo que reafirma su papel clave como floculante natural en el tratamiento del agua cruda. Además, la interacción entre ambas variables también resulta significativa (Valor F = 31,82; p = 0,000), lo que sugiere que la efectividad de una depende del nivel de la otra. Esta sinergia entre bentonita y *Opuntia ficus-indica* destaca la importancia de considerar combinaciones óptimas de dosis para maximizar la eficiencia del tratamiento. En conjunto, estos resultados respaldan la hipótesis alternativa específica (H_1) y confirman que la variación de dosis de ambos coagulantes naturales sí tiene un efecto significativo sobre la remoción de turbiedad, validando su utilidad en condiciones reales de tratamiento de aguas crudas.

Figura 30

Gráfica de probabilidad normal para la remoción de SST (baja turbiedad)



La Figura 30 muestra la prueba de normalidad para la remoción de SST, y el valor obtenido de " $p > 0,05$ " indica que se acepta la hipótesis alterna. Esto significa que, estadísticamente, los datos no proceden de una población normal. Por lo tanto, se puede utilizar la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para la contratación de hipótesis.

Tabla 24*Resumen del modelo de SST (baja turbiedad)*

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
5.18804	46,44%	42,75%	36,68%

El resumen del modelo para la remoción de sólidos suspendidos totales (SST) en condiciones de baja turbiedad muestra un error estándar de estimación (S) de 5,19, lo que indica una dispersión moderada de los datos respecto a la línea de regresión. El coeficiente de determinación (R-cuadrado) de 46,44% señala que el modelo explica aproximadamente el 46% de la variabilidad en la remoción de SST. Sin embargo, el R-cuadrado ajustado (42,75%) y el R-cuadrado predictivo (36,68%) revelan que, al ajustar por el número de predictores y al evaluar su capacidad de predicción, el modelo presenta una capacidad explicativa y predictiva moderadamente baja. Esto sugiere que otros factores no incluidos en el modelo podrían estar influyendo en la remoción de SST bajo estas condiciones.

Ecuación de regresión

$$\% \text{ Remoción}_{\text{SST}_E} = 73,45 + 0,0798 \text{ Dosis}_{\text{bentonita}} + 0,4036 \text{ Dosis}_{\text{Opuntia ficus}}$$

La ecuación de regresión para la remoción de sólidos suspendidos totales (SST) bajo condiciones de alta turbiedad indica que el porcentaje estimado de remoción (%_Remoción_SST_E) depende directamente de las dosis aplicadas de bentonita y *Opuntia ficus-indica*. Específicamente, por cada mililitro adicional de bentonita, la remoción de SST aumenta en 0,0798%, mientras que por cada mililitro adicional de *Opuntia ficus-indica*, el incremento es de 0,4036%. El valor constante de 73,45% representa la remoción estimada cuando ambas dosis son cero. Esta ecuación muestra que el floculante *Opuntia ficus-indica* tiene un mayor efecto positivo sobre la eficiencia del tratamiento que la bentonita.

A. Prueba de Kruskal-Wallis: Dosis de *Opuntia ficus-indica* baja turbiedad

Tabla 25

Estadística descriptiva de la dosis de Opuntia ficus-indica (baja turbiedad)

Dosis de <i>Opuntia ficus-indica</i>	N	Mediana	Clasificación de medias	Valor Z
10	8	85,7143	14,1	-0,85
20	8	85,7143	17,5	0,35
30	8	89,7619	17,4	0,33
40	8	85,7143	17,0	0,17
General	32		16,5	

Tabla 26

Kruskal-Wallis de dosis de la dosis de Opuntia ficus-indica (baja turbiedad)

Método	GL	Valor H	Valor p
No ajustado para empates	3	0,73	0,865
Ajustado para empates	3	0,75	0,860

La Tabla 25 muestra los resultados descriptivos del porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales (SST) obtenidos con diferentes dosis de *Opuntia ficus-indica* en condiciones de baja turbiedad. Las medianas observadas para las cuatro dosis evaluadas (10, 20, 30 y 40 mL) son bastante similares, con un valor constante de 85,71 % para tres de ellas y solo un ligero aumento a 89,76 % en la dosis de 30 mL. Asimismo, los valores Z son bajos y cercanos a cero, lo que indica una ausencia de diferencias marcadas entre los grupos.

Complementariamente, la Tabla 26 presenta los resultados del análisis no paramétrico de Kruskal-Wallis, el cual fue aplicado debido a la naturaleza de los datos (posible no normalidad y muestra pequeña). El valor H obtenido fue 0,75, con un valor p de 0,860, claramente superior al umbral de significancia de 0,05. Esto indica que no existen diferencias

estadísticamente significativas entre las medianas de remoción de SST al variar la dosis de *Opuntia ficus-indica* en este escenario.

B. Prueba de Kruskal-Wallis: Dosis de bentonita (baja turbiedad)

Tabla 27

Estadística descriptiva dosis de bentonita (baja turbiedad)

Dosis_bentonita	N	Mediana	Clasificación de medias	Valor Z
10	8	78,5714	5,2	-3,94
20	8	85,7143	18,2	0,59
30	8	89,7619	20,8	1,48
40	8	89,7619	21,9	1,87
General	32		16,5	

Tabla 28

Kruskal-Wallis de dosis de la dosis de bentonita (baja turbiedad)

Método	GL	Valor H	Valor p
No ajustado para empates	3	16,16	0,001
Ajustado para empates	3	16,61	0,001

La Tabla 27 presenta la estadística descriptiva para las distintas dosis de bentonita (10, 20, 30 y 40 mL) en cuanto a la remoción de sólidos suspendidos totales (SST). Se observa una tendencia clara: a medida que la dosis de bentonita aumenta, la mediana de remoción de SST también se incrementa.

La dosis más baja (10 mL) obtuvo una mediana de 78,57 %, mientras que las dosis de 30 mL y 40 mL alcanzaron una mediana de 89,76 %. Esta diferencia queda reforzada por los valores Z, donde el valor negativo más bajo (-3,94) se asocia a la dosis de 10 mL, indicando una eficiencia significativamente menor en comparación con las demás.

Por su parte, la Tabla 28 muestra los resultados del análisis Kruskal-Wallis, una prueba no paramétrica empleada para evaluar diferencias entre grupos independientes. El resultado del test muestra un valor H =

16,61 con un valor $p = 0,001$, muy por debajo del umbral de significancia de 0,05. Esto permite rechazar la hipótesis nula general y concluir que existen diferencias estadísticamente significativas en la eficiencia de remoción de SST entre las diferentes dosis de bentonita.

4.6.3. *T-student para comparación entre alta y baja turbiedad*

Tabla 29

Estadísticos descriptivos en la remoción de turbiedad

Turbiedad	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
Baja	32	89,60	5,98	1,1
Alta	32	95,38	2,17	0,38

La Tabla 29 muestra que la media de remoción de turbiedad fue mayor en las muestras con turbiedad alta (95,38%) en comparación con aquellas con turbiedad baja (89,60%). Además, la desviación estándar en el grupo de turbiedad alta (2,17) es considerablemente menor que en el grupo de baja turbiedad (5,98), lo que indica menor variabilidad en los resultados cuando la turbiedad inicial es alta. El error estándar de la media también es menor en el grupo de alta turbiedad (0,38 frente a 1,1), lo que refleja mayor precisión en la estimación del promedio en ese grupo.

Tabla 30

Prueba de t-student para remoción de turbiedad

Valor T	GL	Valor p
-5,14	39	0,000

La prueba t de Student reporta un valor $t = -5,14$ con 39 grados de libertad y un valor $p = 0,000$, lo que indica que la diferencia entre medias es estadísticamente significativa. Esto significa que existe una diferencia real en la eficiencia de remoción de turbiedad entre las aguas con turbiedad inicial alta y baja, y no se debe al azar.

Tabla 31*Estadísticos descriptivos en la remoción de SST*

Turbiedad	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
Baja	32	89,60	5,98	1,1
Alta	32	95,38	2,17	0,38

En la tabla 31 la media de remoción de SST en aguas con turbiedad alta fue de 95,38%, mientras que en aguas con turbiedad baja fue de 89,60%. Esta diferencia de aproximadamente 5,78 puntos porcentuales indica una mayor eficiencia del tratamiento en condiciones de turbiedad alta. Además, la desviación estándar fue significativamente menor en la turbiedad alta (2,17) que en la baja (5,98), lo cual evidencia menos variabilidad en los resultados. El error estándar de la media también es inferior en el grupo de turbiedad alta (0,38 vs. 1,1), lo que señala mayor precisión en la estimación del promedio en ese grupo.

Tabla 32*Prueba de t-student para remoción de SST*

Valor T	GL	Valor p
-5,14	39	0,000

El análisis de la Tabla 32 muestra los resultados de la prueba t de Student aplicada para evaluar la diferencia en la remoción de sólidos suspendidos totales (SST) entre condiciones de alta y baja turbiedad inicial. El valor t obtenido fue -5,14 con 39 grados de libertad y un valor p = 0,000, indicando que existe una diferencia estadísticamente significativa entre ambas condiciones. Con un nivel de confianza del 95%, se rechaza la hipótesis nula que planteaba que no existían diferencias significativas en la remoción de SST entre niveles de turbiedad. Por tanto, se concluye que el nivel de turbiedad inicial influye en la eficiencia del tratamiento, siendo más efectivo en condiciones de alta turbiedad.

En apoyo a esta conclusión, los datos obtenidos en las tablas 25 a 28 confirman que las aguas con alta turbiedad inicial alcanzan una mayor eficiencia promedio en la remoción de turbiedad (95,38%) y SST, en comparación con las aguas de baja turbiedad (89,60%). Estos hallazgos refuerzan la hipótesis alternativa general, que sostiene que el uso combinado de bentonita y *Opuntia ficus-indica* como coagulante-floculante sí influye en los parámetros fisicoquímicos del tratamiento de aguas crudas. La diferencia significativa en los resultados según el nivel de turbiedad inicial valida la eficacia del tratamiento, especialmente bajo condiciones de mayor carga contaminante.

V. Discusión

5.1. Efecto de la dosis de bentonita y *Opuntia ficus-indica* como coagulante y floculante sobre la remoción de la turbiedad

Antes del tratamiento, la turbiedad muestra una diferencia significativa entre temporadas: 385 NTU durante la alta turbiedad y 35 NTU en baja turbiedad. Ambos valores superan ampliamente el límite máximo de 5 NTU establecido para agua tratada, siendo especialmente preocupante en épocas de lluvias. En cuanto a los sólidos suspendidos totales (SST), se observa una marcada variación: 374 mg/L en alta turbiedad y 14 mg/L en baja turbiedad.

No obstante, tras aplicar las dosis de tratamiento, se obtuvieron los resultados que se presentan en las figuras 9 y 11, en condiciones de alta turbiedad, la menor turbiedad final se obtuvo con una dosis de 30 mL de bentonita y 30 mL de *Opuntia ficus-indica*, alcanzando una turbiedad residual de 4,65 NTU y un porcentaje de remoción del 98,74 %. Asimismo, de acuerdo con la figura 10, los sólidos suspendidos totales (SST) se redujeron a 2,50 mg/L, con una eficiencia de remoción del 99,33 %. En condiciones de baja turbiedad, según las figuras 16 y 18, la turbiedad final alcanzó un valor de 0,67 NTU, correspondiente a una remoción del 98,19 %, mientras que la figura 14 reporta una concentración final de SST de 1 mg/L, con una eficiencia del 93,10 %. Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran que la aplicación de bentonita como coagulante logró una alta eficiencia en la remoción de turbidez y SST, especialmente en condiciones de alta turbiedad, alcanzando valores de remoción de 98,74 % para la turbidez y 99,33 % para los SST. En condiciones de baja turbiedad, la combinación de bentonita y *Opuntia ficus-indica* (nopal) permitió reducir la turbiedad a 0,67 NTU y los SST a 1 mg/L, cumpliendo ampliamente con los límites establecidos para agua potable según la normativa del MINSA (2010). Además, estos resultados fueron validados estadísticamente mediante las pruebas de Kruskal-Wallis y ANOVA, obteniendo valores de $p < 0,05$, lo que indica que las diferencias entre los tratamientos fueron estadísticamente significativas.

Para reforzar la confianza de los resultados, se calcularon intervalos de confianza al 95 % para los promedios de turbidez y SST, obteniéndose márgenes estrechos

que evidencian baja variabilidad y alta precisión. Este soporte estadístico otorga estabilidad a las conclusiones del estudio (Acevedo y Huamán, 2021).

Estos resultados superan los hallazgos reportados por De La Cruz (2019), quien demostró que la bentonita removió hasta un 96,7 % de turbidez y 96,4 % de color en agua para consumo humano, trabajando con dosis de 150-200 mg/L a pH 3. Esto confirma la alta eficacia de la bentonita incluso en contextos rurales con limitaciones tecnológicas, reforzando su potencial como alternativa sustentable frente a coagulantes químicos tradicionales.

Desde el punto de vista químico, la bentonita es una arcilla compuesta principalmente por montmorillonita actúa gracias a su estructura coloidal y carga superficial negativa, que favorece la adsorción de partículas coloidales presentes en el agua. Al dispersarse, la bentonita crea una suspensión estable que, al interactuar con un coagulante primario (como sulfato de aluminio o PAC), neutraliza cargas y facilita la formación de flóculos más densos y sedimentables. Esta sinergia se explica porque la montmorillonita tiene una alta área superficial y grupos funcionales que permiten la adsorción física y la unión por puentes de hidrógeno (Temochko, 2025). Esta arcilla favorece la neutralización de partículas coloidales mediante la adsorción de cationes y su capacidad para formar microfloculos por desestabilización electrostática. Al combinarse con el mucílago de *Opuntia ficus-indica*, la acción sinérgica se vuelve más eficaz: la bentonita desestabiliza las partículas suspendidas, reduciendo la repulsión eléctrica, mientras que el mucílago actúa como floculante facilitando la formación de enlaces físicos mediante puenteo entre partículas, gracias a sus cadenas de polisacáridos aniónicos que presentan grupos funcionales como carboxilos e hidroxilos (Carolina et al., 2022; Villabona Ortiz et al., 2013).

Estudios previos refuerzan estos hallazgos Carrasquero et al., (2020) demostraron que la bentonita, dosificada a 40 mg/L, logró porcentajes de remoción de 97% en turbidez y 98% en color de efluentes industriales alimentarios, superando el desempeño de coagulantes químicos como sulfato de aluminio (260 mg/L) y cloruro férrico (200 mg/L). Similarmente, en efluentes de lavado de vehículos, Carrasquero et al., (2019) hallaron eficiencias de 92,9% en turbidez y 98,9% en

color, utilizando bentonita como coadyuvante del sulfato de aluminio, lo que permitió reducir la dosis del coagulante químico hasta en un 80%.

En agua potable, la eficacia de la bentonita puede potenciarse al combinarse con biocoagulantes vegetales como *Opuntia ficus-indica*. Othmani et al., (2020) y Dkhissi et al., (2023) demostraron que el mucílago de nopal actúa formando enlaces puente entre partículas y mejorando la floculación, al igual que observó Carolina et al., (2022) en su estudio comparativo con FeCl₃. La acción del mucílago es atribuida principalmente a la formación de redes de polisacáridos que capturan partículas suspendidas por adsorción y puenteo (Choudhary et al., 2019).

En cuanto a condiciones operativas, Alsaeed et al., (2022) determinaron que la bentonita es más efectiva en rangos de pH ligeramente ácidos (5-6) y temperaturas templadas (10 °C a 25 °C), maximizando la eficiencia de coagulación entre 30% y 57%. De forma coherente, De La Cruz, (2019) comprobó que la bentonita muestra su máximo rendimiento a pH ácido (pH 3), lo cual concuerda con la presente investigación.

Por otro lado, Megersa et al., (2024) y Acevedo y Huamán, (2021) destacaron la relevancia del uso de *Opuntia ficus-indica* en combinación o como alternativa, señalando eficiencias de remoción de turbidez del 95% al 98% en aguas superficiales de alta turbiedad. Estos valores coinciden con los logrados en esta investigación al aplicar nopal junto a bentonita, evidenciando la efectividad de los coagulantes naturales en aguas de consumo.

Comparativamente, la bentonita, además de ser económica y abundante, no genera residuos tóxicos ni afecta la composición química del agua, a diferencia de coagulantes metálicos como el sulfato de aluminio, que puede dejar residuos de aluminio residual con potencial impacto en la salud humana (Carrasquero et al., 2020). La reducción de la dependencia de coagulantes sintéticos y el bajo costo operativo refuerzan la viabilidad ambiental y económica del uso de bentonita como coagulante o coadyuvante (Temochko, 2025).

Además, la bentonita como coagulante natural mostró una influencia mínima sobre los parámetros físico-químicos del agua tratada. Inicialmente, el agua presentaba un pH promedio de 7,15 unidades, una temperatura de 13,3 °C y una conductividad eléctrica de 85,4 µS/cm. Luego del tratamiento con bentonita

(30 mL), en condiciones de alta turbiedad, se registró una ligera disminución del pH hasta 5,52, lo cual puede atribuirse a la capacidad de adsorción superficial de la bentonita, que facilita la interacción con especies ácidas en el medio, sin que ello represente una alteración drástica o perjudicial (Renault et al., 2009; Medina et al., 2017). En cuanto a la temperatura, esta se mantuvo prácticamente constante (13,60 °C), lo que confirma que el proceso de coagulación con bentonita no genera reacciones exotérmicas o endotérmicas significativas, y no requiere aporte de energía térmica para su activación (Choy et al., 2014). Por otro lado, la conductividad aumentó hasta 360 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valor aún moderado, que puede explicarse por la liberación controlada de iones minerales propios de la estructura de la bentonita, aunque su carácter predominantemente insoluble impide un aumento brusco de la salinidad del medio tratado (Guevara et al., 2012; Ahalya et al., 2020).

Además, este estudio respalda la tendencia hacia el uso de soluciones híbridas que combinan arcillas naturales con biocoagulantes. El mecanismo conjunto de adsorción, neutralización de cargas y formación de puentes interpartícula resulta más eficiente y ambientalmente amigable, contribuyendo a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de acceso universal a agua potable segura (ONU, 2015).

Desde un punto de vista químico, el mecanismo de floculación de *Opuntia ficus-indica* se basa principalmente en la presencia de polisacáridos aniónicos, como galactosa, arabinosa y ramnosa, presentes en el mucílago, los cuales interactúan con las partículas suspendidas mediante procesos de adsorción y formación de puentes interparticulares (Carolina et al., 2022). Esta interacción permite la aglomeración de partículas coloidales y su posterior sedimentación, sin alterar significativamente el pH del agua, lo que representa una ventaja frente a floculantes sintéticos como el sulfato de aluminio, que pueden modificar la acidez del agua tratada (Megersa et al., 2024).

Los hallazgos de este estudio coinciden con los reportados por Choudhary et al., (2019), quienes documentaron una remoción del 98 % de turbidez en aguas residuales industriales tratadas con mucílago de *Opuntia ficus-indica* a pH neutro, confirmando su eficiencia en diferentes matrices acuosas. Además, observaron la

formación de flóculos en forma de hilos, lo que sugiere una floculación por mecanismo de entrecruzamiento polimérico, compatible con lo observado en nuestras pruebas de jarras.

A nivel nacional, Guevara (2019) reportó una remoción del 54,2 % de turbidez con una dosis de 30 ppm de mucílago de nopal en agua para consumo humano en la región Amazonas. Aunque la eficiencia obtenida fue menor que en nuestro estudio, se debe considerar que las condiciones iniciales del agua y la metodología variaron. Asimismo, Acevedo y Huamán, (2021) lograron una remoción del 99,33 % en agua del río Ichu con una dosis de 40 mL/L, valor casi idéntico al alcanzado en nuestra investigación. Esto respalda la consistencia de los resultados obtenidos y evidencia la efectividad del mucílago vegetal frente a diferentes niveles de turbiedad.

En contextos locales, Herrera et al., (2022) reportaron una remoción del 98 % de turbidez utilizando mucílago de *Opuntia ficus-indica* en aguas del río Mashcón, alcanzando turbiedades finales de 4,9 NTU, dentro de los límites normativos. Estos valores, aunque ligeramente superiores a los obtenidos en el presente estudio, confirman la capacidad de este biocoagulante para generar agua apta para consumo humano.

Adicionalmente, Megersa et al., (2024) determinaron que la eficiencia del mucílago varía según la turbidez inicial del agua. En su estudio, una dosis de 20 mg/L redujo la turbidez de 33 NTU a 5 NTU, mientras que con dosis de 40 mg/L en agua de 100 NTU se logró una remoción del 95 %. Esta correlación positiva entre dosis y eficiencia concuerda con los resultados aquí obtenidos, donde una dosis de 30 mL resultó óptima para niveles elevados de turbiedad.

Desde una perspectiva estructural, la caracterización morfológica de los flóculos realizada por Carolina et al., (2022) mediante SEM y FTIR confirmó la existencia de interacciones moleculares estables entre los grupos funcionales del mucílago y las partículas coloidales del agua. Se demostró que el mecanismo predominante fue la adsorción combinada con la formación de puentes, lo cual explica la eficiencia del biocoagulante aun en condiciones de baja turbiedad.

En términos de sostenibilidad, diversos estudios (Dkhissi et al., 2023; Othmani et al., 2020) subrayan que el uso de extractos de *Opuntia ficus-indica* representa una

solución ambientalmente segura, ya que se trata de un recurso renovable, biodegradable y de bajo costo. Othmani et al., (2020), por ejemplo, lograron una remoción de hasta 69 % de turbidez al utilizar cactus liofilizado en combinación con alumbre en aguas coloreadas, destacando la estabilidad del biocoagulante incluso tras ocho meses de almacenamiento.

Complementando lo anterior, Villabona Ortíz et al., (2013) caracterizaron las propiedades fisicoquímicas del mucílago de nopal y su uso en combinación con coagulantes primarios, observando una disminución significativa en turbiedad (hasta 98 %) sin afectar parámetros como pH y sólidos disueltos. Este comportamiento coincide con lo reportado en nuestro estudio, donde la adición del mucílago no alteró las condiciones fisicoquímicas del agua tratada.

Finalmente, estudios comparativos como el de Mestanza, (2023) validan que el nopal es una de las plantas más eficientes en la reducción de turbiedad respecto a otros coagulantes naturales como *Aloe vera*, alcanzando remociones del 90,5 % en condiciones de laboratorio. A pesar de que el Aloe mostró una ligera ventaja en condiciones ácidas, el nopal demostró mejor desempeño en rangos de pH neutros, más comunes en aguas destinadas al consumo humano.

En conclusión, el mucílago de *Opuntia ficus-indica* constituye una alternativa eficaz, sostenible y accesible para el tratamiento de agua potable, especialmente en zonas rurales donde los recursos y tecnologías convencionales son limitados. Su eficacia comprobada en diversas matrices, estabilidad química y carácter biodegradable refuerzan su potencial como floculante natural en procesos de clarificación de agua.

5.2. Efecto combinado y la relación química entre bentonita y *Opuntia ficus-indica* en procesos de coagulación-floculación

En los procesos de tratamiento de agua potable, la combinación de un coagulante y un floculante permite optimizar de manera significativa la remoción de turbidez y sólidos suspendidos totales (SST), debido a que cada uno actúa sobre diferentes etapas del proceso de clarificación. En este contexto, la bentonita y el mucílago de *Opuntia ficus-indica* (nopal) constituyen una dupla efectiva, cuya acción sinérgica se fundamenta en propiedades fisicoquímicas altamente complementarias que potencian la eficiencia del tratamiento.

La bentonita es una arcilla coloidal rica en montmorillonita, un mineral del grupo de los filosilicatos que presenta una estructura laminar, elevada superficie específica y una marcada capacidad de hinchamiento en presencia de agua. Su superficie está cargada negativamente, lo que le permite actuar como coadyuvante de coagulación al adsorber cationes presentes en el medio, incluyendo aquellos añadidos mediante coagulantes primarios como el policloruro de aluminio (PAC) o el alumbre. Este fenómeno de adsorción y neutralización de cargas reduce la repulsión electrostática entre partículas coloidales, permitiendo su acercamiento y aglomeración en microflóculos inestables (Temochko et al., 2025).

Paralelamente, el mucílago de *Opuntia ficus-indica* contiene polisacáridos aniónicos de alto peso molecular tales como galactosa, arabinosa y ramnosa que presentan grupos funcionales como carboxilos (-COOH) e hidroxilos (-OH). Estos grupos facilitan la interacción electrostática con partículas coloidales cargadas positivamente, así como la formación de enlaces de hidrógeno y puentes físicos entre partículas previamente desestabilizadas (Villabona et al., 2013; Carolina et al., 2022). Gracias a la longitud y flexibilidad de sus cadenas poliméricas, el mucílago puede formar una red tridimensional capaz de atrapar múltiples microflóculos y consolidarlos en macroflóculos más densos, compactos y sedimentables.

Desde el punto de vista químico, la interacción sinérgica entre ambos compuestos puede explicarse como un proceso de dos etapas claramente diferenciadas:

1. Coagulación inicial con bentonita: en esta etapa, la bentonita actúa como adsorbente y neutralizador de cargas. Su eficacia es particularmente alta en aguas con pH entre 5 y 7, donde logra desestabilizar partículas en suspensión que originalmente estaban en equilibrio coloidal. Al captar cationes y reducir la doble capa eléctrica que rodea a las partículas, se favorece su colisión y agregación en microflóculos (Alsaed et al., 2022).
2. Floculación mediante mucílago de *Opuntia*: una vez formados los microflóculos, el mucílago de nopal interviene como floculante natural. Sus largas cadenas de polisacáridos se entrelazan con los microflóculos por medio de interacciones polares, enlaces de hidrógeno y adsorción superficial,

formando flóculos de mayor tamaño y masa que sedimentan más rápidamente por efecto de la gravedad (Choudhary et al., 2019; Carolina et al., 2022).

Este modelo de acción ha sido validado experimentalmente por estudios como el de Othmani et al. (2020), quienes reportaron mejoras significativas en la remoción de turbidez al combinar formulaciones de cactus con coagulantes minerales. Igualmente, Temochko et al., (2025) evidenciaron que la combinación de bentonita policatiónica con PAC logró incrementar entre un 28 % y 57 % la eficiencia del tratamiento respecto al uso exclusivo de PAC, lo que respalda la existencia de una interacción positiva entre coagulantes y floculantes con mecanismos de acción diferenciados pero complementarios.

Asimismo, la bentonita aporta beneficios adicionales como su capacidad de adsorber metales pesados, aceites y contaminantes orgánicos, lo que amplía su utilidad en matrices acuosas complejas. Por su parte, el mucílago de *Opuntia* no modifica significativamente parámetros como el pH, lo que representa una ventaja frente a coagulantes sintéticos que suelen generar alteraciones en la química del agua tratada (Dkhissi et al., 2023; Acevedo & Huamán, 2021).

Desde una perspectiva ambiental y operacional, esta combinación reduce la necesidad de coagulantes químicos tradicionales, disminuye la generación de lodos residuales y minimiza el impacto tóxico en los ecosistemas. Además, al tratarse de materiales naturales, económicos y biodegradables, resultan especialmente apropiados para ser utilizados en zonas rurales o con recursos limitados.

En resumen, el éxito de la combinación entre bentonita y *Opuntia ficus-indica* radica en que mientras la bentonita neutraliza las cargas coloidales favoreciendo la coagulación, el mucílago vegetal consolida el proceso mediante una floculación eficiente, basada en el puenteo polimérico. Esta sinergia permite alcanzar una remoción más eficaz de turbidez y SST, con menores tiempos de sedimentación y menores dosis requeridas, consolidándose como una estrategia sostenible, accesible y técnicamente viable para el tratamiento de agua potable (Carolina et al., 2022; Megersa et al., 2024).

5.3. Efecto de la dosis de la bentonita y *Opuntia ficus-indica* sobre los parámetros fisicoquímicos pH, temperatura y conductividad

Según las figuras 7, 8 y 9, bajo condiciones de alta turbiedad y con la aplicación de 30 mL de bentonita y 30 mL de extracto de *Opuntia ficus-indica*, se registraron los siguientes parámetros fisicoquímicos en el agua tratada: temperatura de 13,60 °C, pH de 5,52 y conductividad eléctrica de 360 µS/cm. En condiciones de baja turbiedad, de acuerdo con las figuras 13, 14 y 15, se obtuvieron valores similares: pH de 5,76, temperatura de 13,60 °C y conductividad eléctrica de 347 µS/cm, respectivamente.

El uso combinado de bentonita y *Opuntia ficus-indica* como coagulante-floculante natural no generó alteraciones significativas en los parámetros fisicoquímicos del agua tratada, tales como el pH, la temperatura o la conductividad eléctrica. Inicialmente, el agua cruda presentó un pH de 7,15, una temperatura de 13,3 °C y una conductividad eléctrica de 85,4 µS/cm, valores que se mantuvieron relativamente estables después del tratamiento. Esta estabilidad puede atribuirse a la naturaleza inorgánica de la bentonita, que actúa como coagulante físico sin liberar compuestos ácidos o básicos, y a la composición neutra de los mucílagos de *Opuntia*, los cuales no modifican significativamente el equilibrio iónico del medio (Hocine et al., 2024).

En muestras con alta turbiedad, el uso de 30 mL de bentonita y 30 mL de *Opuntia ficus-indica* permitió reducir la turbiedad hasta 4,65 NTU y los SST a 2,5 mg/L, mientras que la temperatura (13,60 °C), el pH (5,52) y la conductividad eléctrica (360 µS/cm) se mantuvieron dentro de un rango aceptable. Estos resultados concuerdan con los hallazgos de Miller et al. (2008), quienes reportaron que los polisacáridos de *Opuntia* promueven una aglomeración eficiente sin alterar significativamente la química del agua. Asimismo, la bentonita, al ser un mineral arcilloso de carga negativa, facilita la neutralización de partículas suspendidas sin provocar variaciones sustanciales en la conductividad (Fedala et al., 2015).

De manera similar, en muestras con baja turbiedad, se alcanzaron valores de 0,67 NTU de turbiedad y 1,00 mg/L de SST, manteniéndose la temperatura en 13,60 °C, el pH en 5,76 y la conductividad eléctrica en 347 µS/cm. La ligera acidificación observada se asocia a la presencia de compuestos orgánicos del

mucílago de *Opuntia*, aunque no compromete la calidad del agua tratada ni afecta el funcionamiento de los sistemas hidráulicos. Esta eficacia es respaldada por estudios como el de Hocine et al. (2024), quienes destacaron la capacidad del mucílago de *Opuntia* para formar flóculos compactos y estables en un amplio rango de condiciones fisicoquímicas.

VI. Conclusiones

Se concluye que el uso combinado de bentonita y *Opuntia ficus-indica* ejerce una influencia positiva y significativa en el tratamiento de aguas crudas en Pampas. La combinación evaluada logró altas eficiencias de remoción de turbiedad y sólidos suspendidos totales, sin afectar de manera significativa los parámetros fisicoquímicos del agua tratada. Esto demuestra que se trata de una alternativa viable, natural y sostenible para mejorar la calidad del agua destinada al consumo humano.

Se concluye que la dosis de 30 mL de bentonita combinada con 30 mL de *Opuntia ficus-indica* fue la más efectiva en ambos escenarios. En condiciones de alta turbiedad, se alcanzó una remoción del 98,74 % (4,65 NTU), mientras que en baja turbiedad se logró una remoción del 98,19 % (0,67 NTU). Estos resultados confirman que la dosis aplicada influye de forma directa en la eficiencia del tratamiento.

Se concluye que el tratamiento con bentonita y *Opuntia ficus-indica* no altera significativamente los parámetros fisicoquímicos del agua tratada. Los valores de pH (5,52–5,76), temperatura (13,60-13,60 °C) y conductividad eléctrica (360-347 $\mu\text{S}/\text{cm}$) se mantuvieron dentro de rangos aceptables y estables, tanto en alta como en baja turbiedad. Esto respalda la viabilidad del uso de estos biocoagulantes sin comprometer la calidad del agua procesada.

VII. Recomendaciones

Para ampliar las opciones de tratamiento, se sugiere evaluar la eficacia de otras especies vegetales con propiedades floculantes, como *Moringa oleifera*, *Cassia angustifolia* o *Cactus sphaericus*, las cuales han demostrado potencial en la clarificación de aguas residuales y podrían ofrecer sinergias valiosas al combinarse con bentonita.

Por otro lado, se recomienda realizar estudios adicionales enfocados exclusivamente en la bentonita, considerando variables como el tipo de bentonita (sódica o cálcica), su grado de pureza, y su comportamiento en diferentes matrices de agua. Esto permitiría optimizar su dosificación y aumentar la comprensión de su mecanismo de acción como coagulante natural en condiciones locales específicas.

Además de los parámetros físico-químicos básicos, se sugiere evaluar el contenido de materia orgánica, metales pesados y carga microbiológica en el agua tratada, para obtener una visión más integral de la calidad del agua obtenida.

Se sugiere estudiar la velocidad de formación de flóculos y la sedimentación, lo cual permitiría optimizar los tiempos de contacto y decantación, mejorando la eficiencia operativa del sistema.

Dado que el proceso reduce turbiedad y SST, se sugiere combinarlo con métodos de desinfección, ya que una menor turbiedad mejora la efectividad de estos tratamientos posteriores.

VIII. Referencias bibliográficas

- Acevedo, S. Y. y Huaman, H. (2021). Eficiencia del coagulante de mucílago de nopal (*Opuntia ficus-indica*) en la remoción de la turbiedad del Río Ichu - Huancavelica - 2019. *Universidad Nacional de Huancavelica*, 1–239. <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/4057>
- Alsaeed, R. D. y Alaji, B. y Ibrahim, M. (2022). Using Bentonite Clay as Coagulant Aid for Removing Low to Medium Turbidity Levels. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 41(12), 4080–4086. <https://doi.org/10.30492/IJCCE.2022.535532.4873>
- Alvarado, R., Pardo, D. y Velásquez, M. (2024). Bentonite Clay as a Coadjuvant with Aluminum Sulfate for the Reduction of Physicochemical Parameters in Wastewater from the Textile Industry. *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*, 1–11. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2024.1.1.767>
- Bautista, J., Nieves, C., Felipe, A. y Gonzalez, P. (2023). *Efecto de la conductividad eléctrica a partir de la salinidad y sólidos disueltos en los procesos biológicos de nitrificación y desnitrificación para la remoción de compuestos nitrogenados en aguas residuales domésticas*. <https://hdl.handle.net/11323/10205>
- Briones, P. G. E., Burgos, B. G. A., Rosero D. E. A. y Moreira, M. C. A. (2020). Aplicaciones de sales inorgánicas en el tratamiento de aguas residuales industriales procedente de la refinación de aceites y grasas. *Colón Ciencias, Tecnología y Negocios*, 7(2). <https://doi.org/10.48204/j.colonciencias.v7n2a4>
- Cardenas, S. M. (2022). *Calidad microbiológica del canal de ganado vacuno beneficiadas en el matadero "Los Andes" Auray-Chilca-Huancayo, 2021*. <https://hdl.handle.net/20.500.12848/4887>
- Carhuas, R. K. (2023). *Aplicación del mucílago de nopal en la remoción de turbiedad en aguas contaminadas del río Chilca por efluentes domésticos en la provincia de Huancayo 2020*. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/13384>
- Carolina, O. M., Wilches, T. A., Rafael, L. C., Ricardo, C. G. y Gómez, C. J. A. (2022). Use of *Opuntia ficus-indica* Fruit Peel as a Novel Source of Mucilage with

- Coagulant Physicochemical/Molecular Characteristics. *Polymers*, 14(18).
<https://doi.org/10.3390/polym14183832>
- Carrasquero, S. y Cordero, R. y Mas, M. y Vargas, L. (2015). Tratamiento de efluentes de una industria procesadora de harina mediante coagulación- floculación. *Multiciencias*, 15(3), 256–264.
<https://www.redalyc.org/pdf/904/90444727003.pdf>
- Carrasquero, S. J., Díaz, A., Suárez, A., Rincón, A., & Socorro, D. (2019). Effectiveness of bentonite as a clarifier in the treatment of effluents from the washing of vehicles. *REDIELUZ*, 6(1), 36–43.
<https://www.researchgate.net/publication/336348814>
- Carrasquero, S., Márquez, A., Segovia, A., Zambrano, G. y Díaz, A. (2020). La bentonita como agente clarificante de un efluente industrial alimentario: su comparacion con coagulantes quimicos tradicionales. *Universidad Del Zulia*, 5(2), 11–31. <https://doi.org/10.33936/rev>
- Cesen, F. L. F. y Rivas, F. F. J. (2022). *Evaluación del manejo biológico, químico y convencional de enfermedades del filoplano en el cultivo establecido de tuna (Opuntia ficus indica L.)*. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/18624>
- Choudhary, M., Ray, M. B. y Neogi, S. (2019). Evaluation of the potential application of cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a bio-coagulant for pre-treatment of oil sands process-affected water. *Separation and Purification Technology*, 209, 714-724.
<https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2018.09.033>
- Coronado, B. A., y Sthefany, K. (2022). Instalación del Servicio de Agua Potable y Saneamiento Rural en las Localidades: Balcón, Rodiopampa y Talhuis – Tayacaja - Huancavelica. *Repositorio Institucional - UPLA*.
<http://repositorio.upla.edu.pe/handle/20.500.12848/3712>
- De La Cruz, V. K. L. (2019). *Remoción de turbidez, color y Escherichia coli en agua para consumo humano, utilizando arcilla bentonita y moringa (Moringa oleifera Lam.) – Amazonas, Perú* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas]. <https://hdl.handle.net/20.500.14077/1707>

- Díaz, G. S. y González, P. J. (2022). La importancia de la temperatura del agua en las redes de abastecimiento. *Ingeniería del Agua*, 26(2). <https://doi.org/10.4995/ia.2022.17366>
- Dkhissi, O., El Hakmaoui, A., Chatoui, M., Bouyakhsass, R., Bakraouy, H., Kurniawan, T. A., Anouzla, A., Jada, A. y Souabi, S. (2023). Vegetable Oil Refinery Wastewater Treatment by Using the Cactus as a Bio-flocculant in the Coagulation-Flocculation Process. *Water, Air, and Soil Pollution*, 234(5). <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06337-1>
- El Mansouri, I., Lahkimi, A., El Outassi, N., Adachi, A. y Bekkari, H. (2023). Use of a New Bio-Flocculent Extracted from Moroccan Cactus in the Treatment of Polyphenol-Laden Waste by the Flocculation Coagulation Process. *Ecological Engineering and Environmental Technology*, 24(5), 51-62. <https://doi.org/10.12912/27197050/163123>
- Fedala, N., Lounici, H., Drouiche, N., Mameri, N., & Drouiche, M. (2015). Physical parameters affecting coagulation of turbid water with *Opuntia ficus-indica cactus*. *Ecological Engineering*, 77, 33–36. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.01.007>
- Figuroa, M. I. F., Leigue, F. M. A. y Angulo, R. M. R. (2023). Evaluación de la eficiencia como coagulante-floculante del mucílago obtenido de tuna. *Actas del Congreso Internacional sobre Ingeniería y Gestión de Proyectos*, 1306-1317. <https://doi.org/10.61547/3445>
- García, B. D. (2018). *Agua cruda, la nueva moda antiprogreso del primer mundo — Cuaderno de Cultura Científica*. García Bello, Déborah. <https://culturacientifica.com/2018/01/11/agua-cruda-la-nueva-moda-antiprogreso-del-primer-mundo/>
- Gaspar, C. F. (2021). *Reducción de la Turbiedad de las Aguas del Rio Shullcas, Utilizando Penca de Tuna y Sulfato de Aluminio en el Proceso de Coagulación para el Tratamiento de Agua Potable*. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/71799>
- Gutierrez, G. K. G., Meneses, F. N. M. y Sanchez, C. M. E. (2022). *Acción conjunta de coagulantes (Opuntia ficus-indica-sulfato de aluminio) para la reducción de*

contaminantes del agua residual del camal de res, distrito San Vicente-provincia de Cañete, 2022". <https://hdl.handle.net/20.500.12952/7564>

- Guevara, A. (2019). Rendimiento floculante del mucílago de nopal (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill) y sulfato de aluminio en la clarificación del agua para consumo humano, Bagua, Región Amazonas, 2018. *Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas*, 124. http://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/UNTRM/1482/CHAPA_GRANDEZ_SALLY_PATRICIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Herrera, B. J. M., Sanchez, T. G., Díaz, R. J. y Calderón, C. M. (2022). Comparison of efficiency in the removal of turbidity in surface waters of the Mashcón river through the dosage of *Solanum tuberosum* starch, *Salvia hispanica* mucilages and *Opuntia ficus-indica* in the province of Cajamarca, 2022. *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology, 2022-December*. <https://doi.org/10.18687/LEIRD2022.1.1.197>
- Hocine, H., Benettayeb, A., Al-Farraj, S., Alkahtane, A. A., Olivier, J. & Sillanpää, M. (2024). Turbidity removal from synthetic bentonite suspension using *Opuntia ficus-indica* (cactus). *International Review of Civil Engineering*, 15(1), 12–21. <https://doi.org/10.15866/irece.v15i1.23223>
- Huaman, V. S., Lucen, E. M., Paredes, V. M. y Changanqui, A. D. (2020). Evaluación de la calidad del agua de la Laguna Marvilla en los Pantanos de Villa (Lima – Perú). *South Sustainability*. <https://doi.org/10.21142/ss-0102-2020-019>
- Iannacone, J. y Molano L. J. D. (2018). Tratamiento de efluentes de la industria alimentaria por coagulación-floculación utilizando almidón de *Solanum Tuberosum* l. ‘PAPA’ como alternativa al manejo convencional. *Biotempo*, 15(1). <https://doi.org/10.31381/biotempo.v15i1.1699>
- Jaco, E., Gómez, W., Loroña, F., Zamora, N., y Huaman, N. (2022). Eficiencia de la *Opuntia ficus indica* como coagulante para el tratamiento de las aguas residuales grises y su aplicación en un sistema piloto. *Ingeniería del Agua*, 26(3). <https://doi.org/10.4995/ia.2022.17478>

- Jiménez, A. J., Quesada, D. S., y Romero, E. L. G. (2022). Remoción de materia orgánica natural por tratamiento convencional de agua en un río tropical. *Revista Tecnología en Marcha*. <https://doi.org/10.18845/tm.v35i2.5547>
- Jurado, D. C. y Yzarra, H. L. (2021). Calidad del agua potable y su influencia en la salud humana. *GnosisWisdom*, 1(3). <https://doi.org/10.54556/gnosiswisdom.v1i3.19>
- Llovera, A. C. A. y Chuquipoma S. D. (2023). *21st LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: «Leadership in Education and Innovation in Engineering in the Framework of Global Transformations: Integration and Alliances for Integral Development» Efficacy of natural coagulants in the treatment of domestic wastewater. A systematic review*. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2023.1.1.205>
- López, P. M. (2018). *Evaluación del uso de la cactácea Opuntia ficus-indica como coagulante natural para el tratamiento de aguas*. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3541>
- Lopez, V. M. y Pisco B. D. G. (2023). *Formulación y aceptabilidad de néctar de penca de tuna (Opuntia ficus indica) saborizado con pulpa de maracuyá (Passiflora edulis)*. <https://repositorio.ulcb.edu.pe/handle/ULCB/1209>
- Lozada, J. (2014). Investigación aplicada: Definición, propiedad intelectual e industria. *CienciaAmérica: Revista de divulgación científica de la Universidad Tecnológica Indoamérica*, 3(1), 47-50. <https://cienciamerica.edu.ec/index.php/uti/article/view/30>
- Marco, L., Azario, R., & Metzger, C. (2004). *La turbiedad como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales. Propuestas a propósito del estudio del sistema de potabilización y distribución en la ciudad de Concepción del Uruguay*. *Higiene y Sanidad Ambiental*, 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)
- Martínez, O. M. R., Mendoza, C. J. Y., Medrano, S. B. E., Gómez, T. L. M., y Zafra, M. C. A. (2020). Evaluación de la turbiedad como parámetro indicador del

- tratamiento en una planta potabilizadora municipal. *Revista UIS Ingenierías*, 19(1).
<https://doi.org/10.18273/revuin.v19n1-2020001>
- Megersa, M., Ayenew, B., Adere, A., Tedla, H., Abera, J., Kebede, B. & Dida, G. (2024). *Treatment of turbid surface water using Opuntia ficus-indica as a plant-based coagulant*. *Journal of Environmental Science for Sustainable Development*, 3(1). <https://doi.org/10.20372/mwu.jessd.2024.1561>
- Mestanza I. I. T. (2023). *Comparación de la eficiencia en la reducción de turbidez del agua usando la penca sábila (Aloe vera) respecto al nopal (Opuntia ficus-indica) en el distrito de Cumba, Utcubamba – Amazonas, 2022* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas]. <https://hdl.handle.net/20.500.14077/3609>
- Miller, S. M., Fugate, E. J., Craver, V. O., Smith, J. A., & Zimmerman, J. B. (2008). Toward understanding the efficacy and mechanism of *Opuntia spp.* as a natural coagulant for potential application in water treatment. *Environmental Science & Technology*, 42(12), 4274–4279. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es7025054>
- MINSA. (2010). Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. *Ministerio de Salud*, 508–514. <https://doi.org/10.4159/harvard.9780674734050.c14>
- Othmani, B., Gamelas, J. A. F., Rasteiro, M. G. y Khadhraoui, M. (2020). Characterization of two cactus formulation-based flocculants and investigation on their flocculating ability for cationic and anionic dyes removal. *Polymers*, 12(9), 1–18. <https://doi.org/10.3390/polym12091964>
- ONU. (2015). *Conferencia Anual 2015 de la ONU-Agua en Zaragoza. Agua y Desarrollo Sostenible: de la visión a la acción*.
- Ortega, E. L. R., Cierito, L. E. O., Vega-Guevara, M. R., Angulo-Romero, A., Ruiz-Huaman, C. M., Curo, G. G., y Dumont, J. R. D. (2022). Aloe Vera (L.) is a flocculant to remove turbidity from surface water. *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*, 62(3), 526-543. <https://doi.org/10.52808/BMSA.7E6.623.019>
- PCM. (2023). *Perú: alto riesgo de vulnerabilidad debido a crisis del agua - Noticias - Centro Nacional de Planeamiento Estratégico - Plataforma del Estado Peruano*.

<https://www.gob.pe/institucion/ceplan/noticias/690049-peru-alto-riesgo-de-vulnerabilidad-debido-a-crisis-del-agua>

- Pérez, B. C. U. y Guerrero, B. L. F. (2022). Fibras para estabilizar tepetate utilizado en la construcción de bajareque. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 10(Especial2). <https://doi.org/10.29057/icbi.v10iespecial2.8670>
- Ramos, G. C. A. (2020). Alcances de una investigación. *CienciAmérica*, 9(3), 1-6. <https://doi.org/10.33210/ca.v9i3.336>
- Romana, J. C. (2012). Estadística experimental: Herramientas para investigación. Fondo Editorial UPT-Perú. <https://biblioteca.unapiquitos.edu.pe/bib/23759>
- Samame, T. Y. Y. (2019). *Dosis óptima del mucilago de Opuntia ficus-indica para mejorar la calidad del agua del río la Leche, Lambayeque*. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/35380>
- Sánchez, J. L. T. (2022). *Evaluación de la eficiencia del nopal (Opuntia ficus-indica) para la disminución de la turbiedad del río Carrizal en época lluviosa* (pp. 1-67). <http://repositorio.espam.edu.ec/handle/42000/1887>
- SUNASS. (2020). *El tratamiento de aguas residuales en el Perú aumentó en 11 %, entre el 2016 y el 2020*. <https://www.sunass.gob.pe/lima/el-tratamiento-de-aguas-residuales-en-el-peru-aumento-en-11-entre-el-2016-y-el-2020/>
- Tayacaja. (12 de Junio de 2022). *Agua potable de pampas, no es apta para el consumo humano a falta de tratamiento, con los años venideros afectara la salud de su poblacion*. Obtenido de <https://web.facebook.com/TayacajaEnLinea>
- Tariq, S., y Wim, P. B. (2023). Inertial effects in sedimenting suspensions of solid spheres in a liquid. *International Journal of Multiphase Flow*, 166. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2023.104498>
- Terán, S. J. L. (2022). *Evaluación de la eficiencia del nopal (Opuntia ficus-indica) para la disminución de la turbiedad del río Carrizal en época lluviosa*. <http://repositorio.espam.edu.ec/handle/42000/1887>
- Temochko, B., de Noni, A. & de Fatima, P. M. M. (2025). Characterization of Polycationic Bentonite Clay and its Use as a Coagulation Aid to Enhance Turbidity

- Removal in Water Treatment Plants. *Water Air Soil Pollut.* 236, 74 (2025).
<https://doi.org/10.1007/s11270-024-07732-y>
- Triviño, P. J. S. y Sánchez, R. J. E. (2023). Wastewater treatment systems in Colombia: A systematic review of advanced oxidation processes for the removal of microbial agents. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8.
<https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100470>
- UNESCO. (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado*. París.
www.unesco.org/open-access/terms-use-ccbysa-en
- Villabona, O. A., Paz, I. C. & Martínez, G. J. (2013). *Caracterización de la Opuntia ficus-indica para su uso como coagulante natural*. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 15(1), 137–144.
<https://www.redalyc.org/pdf/776/77628609014.pdf>
- Villena, C. J. A. (2018). Calidad del agua y desarrollo sostenible. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 35(2).
<https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.352.3719>

IX. Anexo

Anexo A: Monitoreo de las aguas crudas

A1. Identificación de punto de muestreo

Figura 31

Identificación del punto de monitoreo



Nota: Se ubicó el punto de toma de muestra en la entrada de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) de Pampas. Para garantizar una correcta identificación, se colocó una placa con el código correspondiente del punto de muestreo, incluyendo las coordenadas UTM, lo que facilita su localización y seguimiento en futuros monitoreos.

Figura 32

Toma de parámetros de campo



Nota: Con ayuda de un multiparámetro se midió los parámetros de pH, temperatura y conductividad.

Figura 33

Toma de muestra para análisis inicial y corridas experimentales



Nota: Se tomo 1 L de muestra para la caracterización inicial y 20 L para las corridas experimentales.

Anexo B: Obtención del floculante de *Opuntia ficus-indica*

Figura 34

Pesado y cortado de la Opuntia ficus-indica



Nota: Las pencas fueron trozadas en cubos de 1 cm³.

Figura 35

Preparación para la extracción del floculante

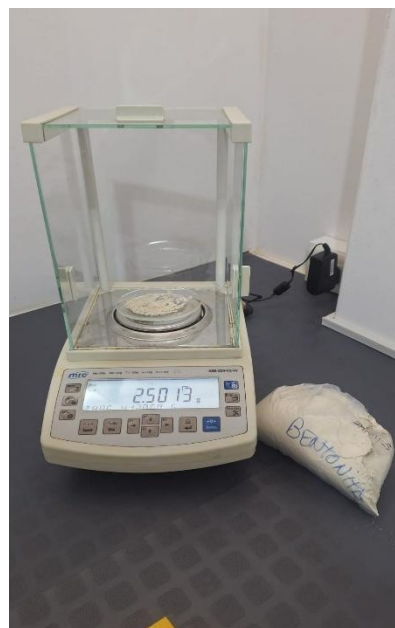


Nota: La penca trozada fue mezclada en una proporción de 1:2 con agua (26 g de penca y 50 mL) y se puso a hervir durante 15 min para extraer el mucílago.

Anexo C: Preparación del coagulante de bentonita

Figura 36

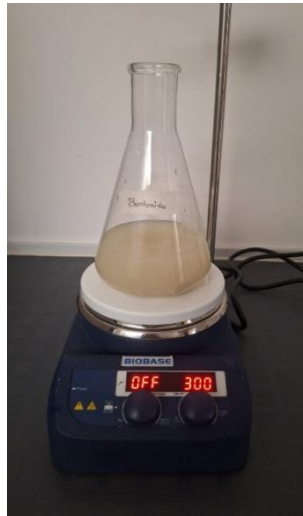
Pesado de la bentonita



Nota: Se peso 2,5 g de bentonita para su preparación como coagulante en solución.

Figura 37

Preparación de la solución de bentonita



Nota: Se preparo una suspensión de bentonita de 2,5 g en 250 mL de agua agitada durante 24 horas para asegurar su homogenización.

Anexo D: Tratamiento de las aguas crudas

Figura 38

Coagulante y floculante



Nota: El coagulante y el floculante previamente preparados fueron ubicados en un lugar accesible y seguro para su manipulación durante el experimento.

Figura 39

Preparación de las muestras de agua



Nota: Se aforaron 4 vasos de precipitación con 1 litro de agua cada uno.

Figura 40

Medición y adición de la dosis de coagulante y floculante



Nota: Se aplicaron dosis de 10 a 40 mL de bentonita y *Opuntia*, medidas con una probeta.

Figura 41

Preparación de la prueba de jarras



Nota: Se realizó mezcla rápida a 120 rpm (3 min) y mezcla lenta a 25 rpm (10 min).

Figura 42

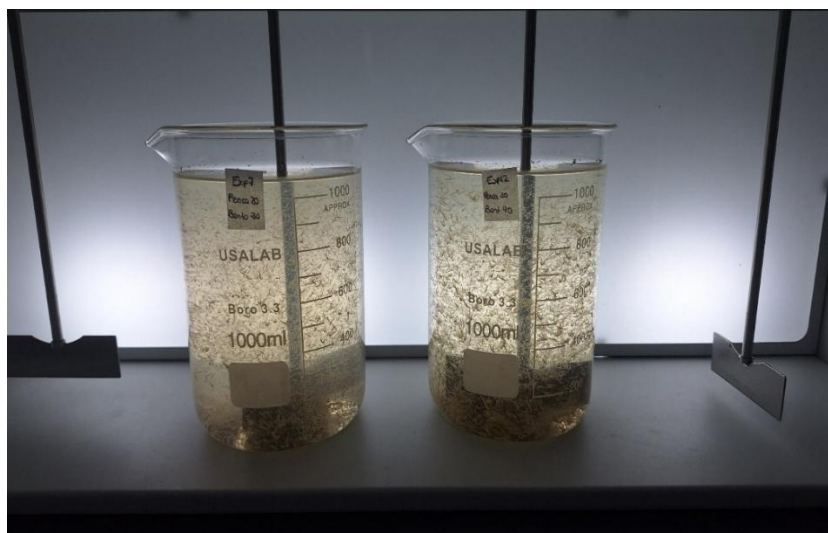
Proceso de coagulación



Nota: Se observa la aplicación de diferentes dosis del coagulante natural (bentonita) en muestras de agua cruda, agitadas a alta velocidad para favorecer el contacto inicial entre las partículas suspendidas y el coagulante, promoviendo su desestabilización.

Figura 43

Proceso de floculación



Nota: Se evidencia la formación de flóculos tras la agitación lenta de muestras tratadas con diferentes combinaciones de dosis de *Opuntia ficus-indica* (30 mL) y bentonita (30 mL y 40 mL)

Figura 44

Proceso de sedimentación



Nota: Finalizado el proceso de agitación, las muestras se dejaron reposar durante 30 minutos para permitir la sedimentación gravitacional de los floculos.

Anexo E. Reportes de laboratorio

INFORME DE ENSAYO N° 0006/25-MTI

Pag: 1 - 1

CLIENTE / RAZÓN SOCIAL REFERENCIA PRODUCTO DECLARADO MATRIZ PROCEDENCIA DE LAS MUESTRAS MUESTREO POR NÚMERO DE MUESTRAS FECHA DE MUESTREO FECHA DE RECEPCIÓN FECHA DE ANÁLISIS CONDICIÓN DE LA MUESTRA	: Lopez Yupanqui Gloria María : Perez Hajar Jack Brando : PROYECTO "Evaluación del uso de bentonita y Opuntia ficus-indica como coagulante-floculante para el tratamiento en aguas crudas, Pampas-2024" : Agua superficial del Río Viñas : Agua superficial : Agua superficial del Río Viñas, cuya corriente desemboca en la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) de Pampas : El cliente : 1 : 27/02/25 : 28/02/25 : 28/02/25 : Los resultados de análisis se aplicaron a la muestra tal como se recepciono.
---	---



MÉTODOLOGÍAS DE ENSAYO

ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	L.C.	UNIDADES
Conductividad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510 B 24th Ed. 2023.	N.A.	uS/cm
pH	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+ B, 24th Ed. 2023.	N.A.	unidad de pH
Temperatura	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2550 B, 24th Ed. 2023.	N.A.	°C
Sólidos Suspendidos Totales	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 24th Ed. 2023	2.5	mg/L
Turbiedad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B, 24th Ed. 2023.	0.1	NTU

L.C. Límite de cuantificación

RESULTADOS DE ANÁLISIS

PRODUCTO DECLARADO	Agua superficial del Río Viñas		
MATRIZ	Agua superficial		
FECHA DE MUESTREO	27/02/2025		
HORA DE MUESTREO	10:00		
COORDENADAS UTM WGS 84	N	8628325	
	E	515023	
ALTITUD (msnm)	3334		
CONDICIÓN DE LA MUESTRA	REFRIGERADA / PRESERVADO		
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	Muestra Inicial		
CÓDIGO DEL CLIENTE	ACH-01		
CÓDIGO DEL LABORATORIO	25022701		
ENSAYO	UNIDADES	RESULTADOS	
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	14.0	
Turbiedad	NTU	35.0	

REFRIGERADA*: la muestra se encuentra conservada según lo requiere el método de ensayo

ENSAYOS DE CAMPO

ENSAYO	UNIDADES	ACH-01
		25022701
Conductividad	uS/cm	60.0
pH	unidad de pH	7.0
Temperatura	°C	13.1

Los análisis de campo lo realizaron profesionales de monitoreo del GRUPO JHACC en presencia del cliente

Huancayo, 04 de Marzo de 2025


Wilmer M. Espinoza Chenca
 SUPERVISOR DE LABORATORIO

OBSERVACIONES: -El informe de ensayo sólo es válido para las muestras referidas en el presente informe. -Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita del GRUPO JHACC SERVICIOS GENERALES S.A.C. -Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de la calidad de la entidad que lo produce

GRUPO JHACC SERVICIOS GENERALES S.A.C.

"EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE



956 988 682 - 971 718 825
954 416 149 - 947 879 574

administracion@grupojhacc.com
grupojhaccsac@gmail.com

Jr. Santa Rosa, N° 1361 - El Tambo
Huancayo - Junin - Perú

INFORME DE ENSAYO N° 0008/25-MTI

Pag. 1 - 2

CLIENTE / RAZÓN SOCIAL	: Lopez Yupanqui Gloria Maria : Perez Hajar Jack Brando
REFERENCIA	: PROYECTO "Evaluación del uso de bentonita y Opuntia ficus-indica como coagulante-floculante para el tratamiento en aguas crudas, Pampas-2024"
PRODUCTO DECLARADO	: Agua superficial Tratada
MATRIZ	: Agua superficial
PROCEDENCIA DE LAS MUESTRAS	: Agua superficial del Río Viñas, cuya corriente desemboca en la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) de Pampas
MUESTREO POR	: El cliente
NÚMERO DE MUESTRAS	: 16
FECHA DE MUESTREO	: 03/03/25
FECHA DE RECEPCIÓN	: 04/03/25
FECHA DE ANÁLISIS	: 04/03/25
CONDICIÓN DE LA MUESTRA	: Los resultados de análisis se aplicaron a la muestra tal como se recepciono.



MÉTODOLOGÍAS DE ENSAYO

ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	L.C.	UNIDADES
Conductividad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510 B, 24th Ed. 2023.	N.A.	uS/cm
pH	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+ B, 24th Ed. 2023.	N.A.	unidad de pH
Temperatura	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2550 B, 24th Ed. 2023.	N.A.	°C
Sólidos Suspendedos Totales	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 24th Ed. 2023.	2.5	mg/L
Turbiedad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B, 24th Ed. 2023.	0.1	NTU

L.C. Límite de cuantificación

RESULTADOS DE ANÁLISIS

PRODUCTO DECLARADO		Agua superficial Tratada					
MATRIZ		Agua superficial					
FECHA DE MUESTREO		3/03/2025	3/03/2025	3/03/2025	3/03/2025	3/03/2025	3/03/2025
CONDICIÓN DE LA MUESTRA		REFRIGERADA / PRESERVADO					
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA		D.Bent 10 / D.Apunt 10	D.Bent 10 / D.Apunt 20	D.Bent 10 / D.Apunt 30	D.Bent 10 / D.Apunt 40	D.Bent 20 / D.Apunt 10	D.Bent 20 / D.Apunt 20
CÓDIGO DEL CLIENTE		LP01-I	LP02-I	LP03-I	LP04-I	LP05-I	LP06-I
CÓDIGO DEL LABORATORIO		25030401	25030402	25030403	25030404	25030405	25030406
ENSAYO	UNIDADES	RESULTADOS					
Conductividad	uS/cm	135.0	254.0	326.0	344.0	176.0	278.0
pH	unidad de pH	6.95	6.54	5.99	5.08	6.9	6.11
Temperatura	°C	13.5	13.4	13.4	13.4	13.3	13.3
Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	3.0	2.0	3.0	2.0	3.0	2.0
Turbiedad	NTU	4.37	1.62	3.94	1.64	5.79	3.77

REFRIGERADA*: la muestra se encuentra conservada según lo requiere el método de ensayo

PRODUCTO DECLARADO		Agua superficial Tratada					
MATRIZ		Agua superficial					
FECHA DE MUESTREO		3/03/2025	3/03/2025	3/03/2025	3/03/2025	3/03/2025	3/03/2025
CONDICIÓN DE LA MUESTRA		REFRIGERADA / PRESERVADO					
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA		D.Bent 20 / D.Apunt 30	D.Bent 20 / D.Apunt 40	D.Bent 30 / D.Apunt 10	D.Bent 30 / D.Apunt 20	D.Bent 30 / D.Apunt 30	D.Bent 30 / D.Apunt 40
CÓDIGO DEL CLIENTE		LP07-I	LP08-I	LP09-I	LP10-I	LP11-I	LP12-I
CÓDIGO DEL LABORATORIO		25030407	25030408	25030409	25030410	25030411	25030412
ENSAYO	UNIDADES	RESULTADOS					
Conductividad	uS/cm	333.0	361.0	201.0	307.0	345.0	392.0
pH	unidad de pH	5.43	5.16	6.84	6.05	5.72	5.36
Temperatura	°C	13.5	13.4	13.4	13.5	13.3	13.4
Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	2.0	2.0	4.0	1.0	1.0	1.0
Turbiedad	NTU	2.68	1.49	8.11	6.8	0.69	1.86

REFRIGERADA*: la muestra se encuentra conservada según lo requiere el método de ensayo

"EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE"



956 988 682 - 971 718 825
954 416 149 - 947 879 574



administracion@grujhacc.com
grujhaccsac@gmail.com



Jr. Santa Rosa, N° 1361 - El Tambo
Huancayo - Junin - Perú



GRUPO JHACC

SERVICIOS GENERALES - ÁREA DE LABORATORIO AMBIENTAL

INFORME DE ENSAYO N° 0008/25-MTI

Pag. 2 - 2

PRODUCTO DECLARADO		Agua superficial Tratada			
MATRIZ		Agua superficial			
FECHA DE MUESTREO		3/03/2025	3/03/2025	3/03/2025	3/03/2025
CONDICIÓN DE LA MUESTRA		REFRIGERADA / PRESERVADO			
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA		D.Bent 40 / D.Apunt 10	D.Bent 40 / D.Apunt 20	D.Bent 40 / D.Apunt 30	D.Bent 40 / D.Apunt 40
CÓDIGO DEL CLIENTE		LP13-I	LP14-I	LP15-I	LP16-I
CÓDIGO DEL LABORATORIO		25030413	25030414	25030415	25030416
ENSAYO		RESULTADOS			
Conductividad	UNIDADES uS/cm	220.0	301.0	355.0	396.0
pH	unidad de pH	6.69	6.03	5.61	5.22
Temperatura	°C	13.4	13.3	13.5	13.4
Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	3.0	2.0	2.0	1.0
Turbiedad	NTU	5.62	4.09	4.85	1.63

REFRIGERADA*: la muestra se encuentra conservada según lo requiere el método de ensayo

Huancayo, 7 de Marzo de 2025


GRUPO JHACC
GU
Wilmer M. Espinoza Chanca
SUPERVISOR DE LABORATORIO

OBSERVACIONES: -El informe de ensayo sólo es válido para las muestras referidas en el presente informe. -Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita del GRUPO JHACC SERVICIOS GENERALES S.A.C. -Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de la calidad de la entidad que lo produce.

GRUPO JHACC SERVICIOS GENERALES S.A.C.

"EI USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE"



956 988 682 - 971 718 825
954 416 149 - 947 879 574



administracion@grupojhacc.com
grupojhaccsac@gmail.com



Jr. Santa Rosa, N° 1361 - El Tambo
Huancayo - Junin - Perú

INFORME DE ENSAYO N° 0020/25-MTI

Pag: 1 - 2

CLIENTE / RAZÓN SOCIAL : Lopez Yupanqui Gloria Maria
 : Perez Hajar Jack Brando
REFERENCIA : PROYECTO "Evaluación del uso de bentonita y Opuntia ficus-indica como coagulante-floculante para el tratamiento en aguas crudas, Pampas-2024"
PRODUCTO DECLARADO : Agua superficial Tratada
MATRIZ : Agua superficial
PROCEDECENCIA DE LAS MUESTRAS : Agua superficial del Río Viñas, cuya corriente desemboca en la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) de Pampas
MUESTREO POR : El cliente
NÚMERO DE MUESTRAS : 17
FECHA DE MUESTREO : 10/03/25
FECHA DE RECEPCIÓN : 11/03/25
FECHA DE ANÁLISIS : 11/03/25
CONDICIÓN DE LA MUESTRA : Los resultados de análisis se aplicaron a la muestra tal como se recepciono.



MÉTODOLOGÍAS DE ENSAYO

ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	L.C.	UNIDADES
Conductividad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510 B 24th Ed. 2023.	N.A.	uS/cm
pH	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part4500-H+ B, 24th Ed. 2023.	N.A.	unidad de pH
Temperatura	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2550 B, 24th Ed. 2023.	N.A.	°C
Sólidos Suspendidos Totales	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 24th Ed. 2023	2.5	mg/L
Turbiedad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B, 24th Ed. 2023.	0.1	NTU

L.C: Límite de cuantificación

RESULTADOS DE ANÁLISIS

PRODUCTO DECLARADO	Agua superficial	Agua superficial Tratada					
MATRIZ	Agua superficial	Agua superficial					
FECHA DE MUESTREO	10/03/25	10/03/2025	10/03/2025	10/03/2025	10/03/2025	10/03/2025	
CONDICIÓN DE LA MUESTRA	REFRIGERADA / PRESERVADO						
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	Muestra inicial	D.Bent 10 / D.Apunt 10	D.Bent 10 / D.Apunt 20	D.Bent 10 / D.Apunt 30	D.Bent 10 / D.Apunt 40	D.Bent 20 / D.Apunt 10	
CÓDIGO DEL CLIENTE	ACH-02	LP01-II	LP02-II	LP03-II	LP04-II	LP05-II	
CÓDIGO DEL LABORATORIO	25031101	25031102	25031103	25031104	25031105	25031106	
ENSAYO	UNIDADES	RESULTADOS					
Conductividad	uS/cm	55.0	133.0	257.0	320.0	341.0	179.0
pH	unidad de pH	7.06	6.92	6.66	5.93	5.07	7.00
Temperatura	°C	13.7	14.1	13.9	14.0	13.9	14.0
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	15.0	4.0	1.0	2.0	2.0	4.0
Turbiedad	NTU	39.00	4.78	1.75	4.38	2.01	6.32

REFRIGERADA*: la muestra se encuentra conservada según lo requiere el método de ensayo

PRODUCTO DECLARADO	Agua superficial Tratada						
MATRIZ	Agua superficial						
FECHA DE MUESTREO	10/03/2025	10/03/2025	10/03/2025	10/03/2025	10/03/2025	10/03/2025	
CONDICIÓN DE LA MUESTRA	REFRIGERADA / PRESERVADO						
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	D.Bent 20 / D.Apunt 20	D.Bent 20 / D.Apunt 30	D.Bent 20 / D.Apunt 40	D.Bent 30 / D.Apunt 10	D.Bent 30 / D.Apunt 20	D.Bent 30 / D.Apunt 30	
CÓDIGO DEL CLIENTE	LP06-II	LP07-II	LP08-II	LP09-II	LP10-II	LP11-II	
CÓDIGO DEL LABORATORIO	25031107	25031108	25031109	25031110	25031111	25031112	
ENSAYO	UNIDADES	RESULTADOS					
Conductividad	uS/cm	270.0	321.0	365.0	194.0	301.0	349.0
pH	unidad de pH	6.24	5.46	5.27	6.80	6.11	5.79
Temperatura	°C	13.9	14.1	14.0	14.0	13.9	13.9
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	1.0	1.0	1.0	3.0	3.0	1.0
Turbiedad	NTU	2.88	2.39	2.46	8.90	7.54	0.64

REFRIGERADA*: la muestra se encuentra conservada según lo requiere el método de ensayo

"EI USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE



956 988 682 - 971 718 825
 954 416 149 - 947 879 574

administracion@grupojhacc.com
 grupojhaccsac@gmail.com

Jr. Santa Rosa, N° 1361 - El Tambo
 Huancayo - Junin - Perú

INFORME DE ENSAYO N° 0020/25-MTI

Pag. 2 - 2

PRODUCTO DECLARADO		Agua superficial Tratada				
MATRIZ		Agua superficial				
FECHA DE MUESTREO		10/03/2025	10/03/2025	10/03/2025	10/03/2025	10/03/2025
CONDICIÓN DE LA MUESTRA		REFRIGERADA / PRESERVADO				
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA		D.Bent 30 / D.Apunt 40	D.Bent 40 / D.Apunt 10	D.Bent 40 / D.Apunt 20	D.Bent 40 / D.Apunt 30	D.Bent 40 / D.Apunt 40
CÓDIGO DEL CLIENTE		LP12-II	LP13-II	LP14-II	LP15-II	LP16-II
CÓDIGO DEL LABORATORIO		25031113	25031114	25031115	25031116	25031117
ENSAYO	UNIDADES	RESULTADOS				
Conductividad	uS/cm	384.0	216.0	307.0	355.0	387.0
pH	unidad de pH	5.30	6.74	6.05	5.66	5.18
Temperatura	°C	13.9	14.0	14.1	14.0	13.9
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	2.0	3.0	3.0	1.0	1.0
Turbiedad	NTU	3.09	6.37	4.84	3.84	1.86

REFRIGERADA*: la muestra se encuentra conservada según lo requiere el método de ensayo

Huancayo, 14 de Marzo de 2025



GRUPO JHACC

Wilmer M. Espinoza Chianca
 SUPERVISOR DE LABORATORIO

OBSERVACIONES: -El informe de ensayo sólo es válido para las muestras referidas en el presente informe. -Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita del GRUPO JHACC SERVICIOS GENERALES S.A.C. -Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de la calidad de la entidad que lo produce.

GRUPO JHACC SERVICIOS GENERALES S.A.C.

"EI USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE



956 988 682 - 971 718 825
 954 416 149 - 947 879 574

administracion@grupojhacc.com
 grupojhaccsac@gmail.com

Jr. Santa Rosa, N° 1361 - El Tambo
 Huancayo - Junín - Perú

INFORME DE ENSAYO N° 0027/25-MTI

Pag: 1 - 1

CLIENTE / RAZÓN SOCIAL	: Lopez Yupanqui Gloria Maria : Perez Hajar Jack Brando
REFERENCIA	: PROYECTO "Evaluación del uso de bentonita y Opuntia ficus-indica como coagulante-floculante para el tratamiento en aguas crudas, Pampas-2024"
PRODUCTO DECLARADO	: Agua superficial del Río Viñas
MATRIZ	: Agua superficial
PROCEDENCIA DE LAS MUESTRAS	: Agua superficial del Río Viñas, cuya corriente desemboca en la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) de Pampas
MUESTREO POR	: El cliente
NÚMERO DE MUESTRAS	: 1
FECHA DE MUESTREO	: 20/03/25
FECHA DE RECEPCIÓN	: 21/03/25
FECHA DE ANÁLISIS	: 21/03/25
CONDICIÓN DE LA MUESTRA	: Los resultados de análisis se aplicaron a la muestra tal como se recepción.



MÉTODOLOGÍAS DE ENSAYO

ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	L.C.	UNIDADES
Conductividad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510 B 24th Ed. 2023.	N.A.	uS/cm
pH	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part4500-H+ B, 24th Ed. 2023.	N.A.	unidad de pH
Temperatura	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2550 B, 24th Ed. 2023.	N.A.	°C
Sólidos Suspendidos Totales	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 24th Ed. 2023	2.5	mg/L
Turbiedad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B, 24th Ed. 2023.	0.1	NTU

L.C: Límite de cuantificación

RESULTADOS DE ANÁLISIS

PRODUCTO DECLARADO	Agua superficial del Río Viñas	
MATRIZ	Agua superficial	
FECHA DE MUESTREO	20/03/2025	
HORA DE MUESTREO	11:20	
COORDENADAS UTM WGS 84	N	8628325
	E	515023
ALTITUD (msnm)	3334	
CONDICIÓN DE LA MUESTRA	REFRIGERADA / PRESERVADO	
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	Muestra Inicial	
CÓDIGO DEL CLIENTE	ACH-03	
CÓDIGO DEL LABORATORIO	25032101	
ENSAYO	UNIDADES	RESULTADOS
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	374.0
Turbiedad	NTU	385.0

REFRIGERADA*: la muestra se encuentra conservada según lo requiere el método de ensayo

ENSAYOS DE CAMPO

ENSAYO	UNIDADES	ACH-03 25032101
Conductividad	uS/cm	85.4
pH	unidad de pH	7.2
Temperatura	°C	13.3

Los análisis de campo lo realizaron profesionales de monitoreo del GRUPO JHACC en presencia del cliente

Huancayo, 26 de Marzo de 2025



GRUPO JHACC
Wilmer M. Espinoza Chéneca
SUPERVISOR DE LABORATORIO

OBSERVACIONES: -El informe de ensayo sólo es válido para las muestras referidas en el presente informe. -Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita del GRUPO JHACC SERVICIOS GENERALES S.A.C. -Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de la calidad de la entidad que lo produce.

GRUPO JHACC SERVICIOS GENERALES S.A.C.

"EI USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE



956 988 682 - 971 718 825
954 416 149 - 947 879 574

administracion@grupojhacc.com
grupojhaccsac@gmail.com

Jr. Santa Rosa, N° 1361 - El Tambo
Huancayo - Junin - Perú

INFORME DE ENSAYO N° 0029/25-MTI

Pag. 1 - 2

CLIENTE / RAZÓN SOCIAL	: Lopez Yupanqui Gloria Maria
	: Perez Hajar Jack Brando
REFERENCIA	: PROYECTO "Evaluación del uso de bentonita y Opuntia ficus-indica como coagulante-floculante para el tratamiento en aguas crudas, Pampas-2024"
PRODUCTO DECLARADO	: Agua superficial Tratada
MATRIZ	: Agua superficial
PROCEDENCIA DE LAS MUESTRAS	: Agua superficial del Río Viñas, cuya corriente desemboca en la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) de Pampas
MUESTREO POR	: El cliente
NÚMERO DE MUESTRAS	: 16
FECHA DE MUESTREO	: 21/03/25
FECHA DE RECEPCIÓN	: 21/03/25
FECHA DE ANÁLISIS	: 24/03/25
CONDICIÓN DE LA MUESTRA	: Los resultados de análisis se aplicaron a la muestra tal como se recepciono.



MÉTODOLOGÍAS DE ENSAYO

ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	L.C.	UNIDADES
Conductividad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510 B 24th Ed. 2023.	N.A.	uS/cm
pH	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part4500-H+ B, 24th Ed. 2023.	N.A.	unidad de pH
Temperatura	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2550 B, 24th Ed. 2023.	N.A.	°C
Sólidos Suspendidos Totales	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 24th Ed. 2023	2.5	mg/L
Turbiedad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B, 24th Ed. 2023.	0.1	NTU

L.C: Límite de cuantificación

RESULTADOS DE ANÁLISIS

PRODUCTO DECLARADO		Agua superficial Tratada					
MATRIZ		Agua superficial					
FECHA DE MUESTREO		21/03/2025	21/03/2025	21/03/2025	21/03/2025	21/03/2025	21/03/2025
CONDICIÓN DE LA MUESTRA		REFRIGERADA / PRESERVADO					
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA		D.Bent 10 / D.Apunt 10	D.Bent 10 / D.Apunt 20	D.Bent 10 / D.Apunt 30	D.Bent 10 / D.Apunt 40	D.Bent 20 / D.Apunt 10	D.Bent 20 / D.Apunt 20
CÓDIGO DEL CLIENTE		LP01-III	LP02-III	LP03-III	LP04-III	LP05-III	LP06-III
CÓDIGO DEL LABORATORIO		25032101	25032102	25032103	25032104	25032105	25032106
ENSAYO	UNIDADES	RESULTADOS					
Conductividad	uS/cm	154.0	279.0	346.0	361.0	192.0	293.0
pH	unidad de pH	7.45	6.25	6.04	5.96	7.37	6.18
Temperatura	°C	13.2	13.2	13.2	13.2	13.1	13.1
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	7.0	15.0	6.0	5.0	10.0	5.0
Turbiedad	NTU	20.9	37.2	17.9	15.2	25.9	15.3

REFRIGERADA*: la muestra se encuentra conservada según lo requiere el método de ensayo

PRODUCTO DECLARADO		Agua superficial Tratada					
MATRIZ		Agua superficial					
FECHA DE MUESTREO		21/03/2025	21/03/2025	21/03/2025	21/03/2025	21/03/2025	21/03/2025
CONDICIÓN DE LA MUESTRA		REFRIGERADA / PRESERVADO					
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA		D.Bent 20 / D.Apunt 30	D.Bent 20 / D.Apunt 40	D.Bent 30 / D.Apunt 10	D.Bent 30 / D.Apunt 20	D.Bent 30 / D.Apunt 30	D.Bent 30 / D.Apunt 40
CÓDIGO DEL CLIENTE		LP07-III	LP08-III	LP09-III	LP10-III	LP11-III	LP12-III
CÓDIGO DEL LABORATORIO		25032107	25032108	25032109	25032110	25032111	25032112
ENSAYO	UNIDADES	RESULTADOS					
Conductividad	uS/cm	355.0	384.0	218.0	321.0	360.0	404.0
pH	unidad de pH	6.02	5.75	7.16	6.11	5.9	5.69
Temperatura	°C	13.1	13.1	13.3	13.3	13.2	13.2
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	5.0	5.0	13.0	10.0	3.0	4.0
Turbiedad	NTU	15.1	13.9	32.8	27.7	4.9	12

REFRIGERADA*: la muestra se encuentra conservada según lo requiere el método de ensayo

"El uso indebido de este informe de ensayo constituye delito sancionado conforme a la ley, por la autoridad competente"



956 988 682 - 971 718 825
954 416 149 - 947 879 574

administracion@grupojhacc.com
grupojhaccsac@gmail.com

Jr. Santa Rosa, N° 1361 - El Tambo
Huancayo - Junin - Perú


INFORME DE ENSAYO Nº 0029/25-MTI

Pag. 2 - 2

PRODUCTO DECLARADO		Agua superficial Tratada			
MATRIZ		Agua superficial			
FECHA DE MUESTREO		21/03/2025	21/03/2025	21/03/2025	21/03/2025
CONDICIÓN DE LA MUESTRA		REFRIGERADA / PRESERVADO			
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA		D.Bent 40 / D.Apunt 10	D.Bent 40 / D.Apunt 20	D.Bent 40 / D.Apunt 30	D.Bent 40 / D.Apunt 40
CÓDIGO DEL CLIENTE		LP13-III	LP14-III	LP15-III	LP16-III
CÓDIGO DEL LABORATORIO		25032113	25032114	25032115	25032116
ENSAYO	UNIDADES	RESULTADOS			
Conductividad	u/cm	246.0	318.0	371.0	424.0
pH	unidad de pH	6.61	6.07	5.84	5.61
Temperatura	°C	13.1	13.1	13.2	13.3
Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	8.0	5.0	4.0	3.0
Turbiedad	NTU	23.2	18.4	11.1	7.3

REFRIGERADA*: la muestra se encuentra conservada según lo requiere el método de ensayo

Huancayo, 27 de Marzo de 2025



GRUPO JHACC
Wilmer M. Espinoza Obanca
SUPERVISOR DE LABORATORIO

OBSERVACIONES: -El informe de ensayo solo es válido para las muestras referidas en el presente informe --Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita del GRUPO JHACC SERVICIOS GENERALES S.A.C. --Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de la calidad de la entidad que lo produce.

GRUPO JHACC SERVICIOS GENERALES S.A.C.

"EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE



956 988 682 - 971 718 825
 954 416 149 - 947 879 574

administracion@grupojhacc.com
 grupojhaccsac@gmail.com

Jr. Santa Rosa, N° 1361 - El Tambo
 Huancayo - Junin - Perú

INFORME DE ENSAYO N° 0034/25-MTI

Pag: 1 - 2

CLIENTE / RAZÓN SOCIAL	: Lopez Yupanqui Gloria Maria
	: Perez Hajar Jack Brando
REFERENCIA	: PROYECTO "Evaluación del uso de bentonita y Opuntia ficus-indica como coagulante-floculante para el tratamiento en aguas crudas, Pampas-2024"
PRODUCTO DECLARADO	: Agua superficial Tratada
MATRIZ	: Agua superficial
PROCEDENCIA DE LAS MUESTRAS	: Agua superficial del Río Viñas, cuya corriente desemboca en la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) de Pampas
MUESTREO POR	: El cliente
NÚMERO DE MUESTRAS	: 17
FECHA DE MUESTREO	: 25/03/25
FECHA DE RECEPCIÓN	: 25/03/25
FECHA DE ANÁLISIS	: 26/03/25
CONDICIÓN DE LA MUESTRA	: Los resultados de análisis se aplicaron a la muestra tal como se recepciono.



MÉTODOLOGIAS DE ENSAYO

ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	L.C.	UNIDADES
Conductividad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510 B 24th Ed. 2023.	N.A.	uS/cm
pH	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part4500-H+ B, 24th Ed. 2023.	N.A.	unidad de pH
Temperatura	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2550 B, 24th Ed. 2023.	N.A.	°C
Sólidos Suspendidos Totales	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 24th Ed. 2023	2.5	mg/L
Turbiedad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B, 24th Ed. 2023.	0.1	NTU

L.C: Límite de cuantificación

RESULTADOS DE ANÁLISIS

PRODUCTO DECLARADO	Agua superficial Tratada						
	Agua superficial						
MATRIZ	Agua superficial						
FECHA DE MUESTREO	25/03/25	25/03/2025	25/03/2025	25/03/2025	25/03/2025	25/03/2025	
CONDICIÓN DE LA MUESTRA	REFRIGERADA / PRESERVADO						
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	Muestra inicial	D.Bent 10 / D.Apunt 10	D.Bent 10 / D.Apunt 20	D.Bent 10 / D.Apunt 30	D.Bent 10 / D.Apunt 40	D.Bent 20 / D.Apunt 10	
CÓDIGO DEL CLIENTE	ACH-04	LP01-IV	LP02-IV	LP03-IV	LP04-IV	LP05-IV	
CÓDIGO DEL LABORATORIO	25032501	25032502	25032503	25032504	25032505	25032506	
ENSAYO	UNIDADES	RESULTADOS					
Conductividad	uS/cm	89.1	157.0	281.0	344.0	367.0	195.0
pH	unidad de pH	7.07	7.31	6.16	6.08	5.85	7.32
Temperatura	°C	14.0	14.0	13.8	13.9	13.9	14.0
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	368.0	6.0	13.0	5.0	4.0	8.0
Turbiedad	NTU	352.0	15.9	30.6	12.8	12.9	21.1

REFRIGERADA*: la muestra se encuentra conservada según lo requiere el método de ensayo

PRODUCTO DECLARADO	Agua superficial Tratada						
	Agua superficial						
MATRIZ	Agua superficial						
FECHA DE MUESTREO	25/03/2025	25/03/2025	25/03/2025	25/03/2025	25/03/2025	25/03/2025	
CONDICIÓN DE LA MUESTRA	REFRIGERADA / PRESERVADO						
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	D.Bent 20 / D.Apunt 20	D.Bent 20 / D.Apunt 30	D.Bent 20 / D.Apunt 40	D.Bent 30 / D.Apunt 10	D.Bent 30 / D.Apunt 20	D.Bent 30 / D.Apunt 30	
CÓDIGO DEL CLIENTE	LP06-IV	LP07-IV	LP08-IV	LP09-IV	LP10-IV	LP11-IV	
CÓDIGO DEL LABORATORIO	25032507	25032508	25032509	25032510	25032511	25032512	
ENSAYO	UNIDADES	RESULTADOS					
Conductividad	uS/cm	291.0	359.0	388.0	214.0	324.0	360.0
pH	unidad de pH	6.05	5.99	5.68	7.11	6.07	5.14
Temperatura	°C	14.0	14.0	13.9	13.8	13.9	14.0
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	5.0	4.0	4.0	11.0	8.0	2.0
Turbiedad	NTU	13.0	12.8	11.7	27.5	24.1	4.4

REFRIGERADA*: la muestra se encuentra conservada según lo requiere el método de ensayo

"EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE



956 988 682 - 971 718 825
954 416 149 - 947 879 574

administracion@grupojhacc.com
grupojhaccsac@gmail.com

Jr. Santa Rosa, N° 1361 - El Tambo
Huancayo - Junin - Perú

INFORME DE ENSAYO N° 0034/25-MTI

Pag. 2 - 2

PRODUCTO DECLARADO		Agua superficial Tratada				
MATRIZ		Agua superficial				
FECHA DE MUESTREO		25/03/2025	25/03/2025	25/03/2025	25/03/2025	25/03/2025
CONDICIÓN DE LA MUESTRA		REFRIGERADA / PRESERVADO				
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA		D.Bent 30 / D.Apunt 40	D.Bent 40 / D.Apunt 10	D.Bent 40 / D.Apunt 20	D.Bent 40 / D.Apunt 30	D.Bent 40 / D.Apunt 40
CÓDIGO DEL CLIENTE		LP12-IV	LP13-IV	LP14-IV	LP15-IV	LP16-IV
CÓDIGO DEL LABORATORIO		25032513	25032514	25032515	25032516	25032517
ENSAYO		RESULTADOS				
Conductividad	UNIDADES uS/cm	411.0	243.0	317.0	379.0	420.0
pH	unidad de pH	5.22	6.50	6.02	5.70	5.53
Temperatura	°C	14.0	14.0	13.8	13.8	13.9
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	3.0	6.0	4.0	4.0	2.0
Turbiedad	NTU	9.2	19.7	14.1	10.5	7.2

REFRIGERADA*: la muestra se encuentra conservada según lo requiere el método de ensayo

Huancayo, 31 de Marzo de 2025



GRUPO JHACC
Wilmer M. Espinoza Chancia
SUPERVISOR DE LABORATORIO

OBSERVACIONES: -El informe de ensayo sólo es válido para las muestras referidas en el presente informe. -Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita del GRUPO JHACC SERVICIOS GENERALES S.A.C. -Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de la calidad de la entidad que lo produce.

GRUPO JHACC SERVICIOS GENERALES S.A.C.

"EI USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE"



956 988 682 - 971 718 825
 954 416 149 - 947 879 574



administracion@grupojhacc.com
 grupojhaccsac@gmail.com



Jr. Santa Rosa, N° 1361 - El Tambo
 Huancayo - Junin - Perú